

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA E ESTATÍSTICA
CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

GABRIELA REGINA LOTHER

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO ECONÔMICO EM SISTEMAS
MULTIAGENTES**

Florianópolis
2025

GABRIELA REGINA LOTHER

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO ECONÔMICO EM
SISTEMAS MULTIAGENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Graduação em Ciência da Computação do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Elder Rizzon Santos, Dr.

Florianópolis

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Lother, Gabriela Regina
DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO ECONÔMICO EM SISTEMAS
MULTIAGENTES / Gabriela Regina Lother ; orientador, Elder
Rizzon Santos, 2025.
57 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Ciências da Computação, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Ciências da Computação. 2. Inteligência Artificial.
3. Sistemas Multiagentes. 4. Economia Computacional. 5.
Simulação Baseada em Agentes. I. Santos, Elder Rizzon. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Ciências da Computação. III. Título.

GABRIELA REGINA LOTHER
**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO ECONÔMICO EM SISTEMAS
MULTIAGENTES**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Ciência da Computação e aprovado em sua forma final pelo curso de Graduação em Ciência da Computação.

Florianópolis, 10 de novembro de 2025.

Prof^a. Lúcia Helena Martins Pacheco, Dra.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Elder Rizzon Santos, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Elder Rizzon Santos, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Maicon Rafael Zatelli, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^a. Jerusa Marchi, Dra.
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina

À Maria Luiza, que foi meu pilar e minha maior incentivadora
nesta reta final. Sua paciência infinita e apoio incondicional
foram decisivos.

À minha família e aos meus amigos, pela compreensão e
suporte.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador, Prof. Elder Rizzon Santos, Dr., pela orientação, paciência e pelas discussões cruciais que guiaram o desenvolvimento deste trabalho. Seu conhecimento, confiança e disponibilidade foram fundamentais para a conclusão deste TCC.

Agradeço igualmente aos membros da banca examinadora, Prof. Maicon Rafael Zattelli, Dr. e Prof^a. Jerusa Marchi, Dra., por terem aceitado o convite, pelo tempo dedicado à leitura e pelas valiosas contribuições e sugestões que certamente enriqueceram esta pesquisa.

*“Starvation is the characteristic of some people not **having** enough food to eat. It is not the characteristic of there **being** not enough food to eat.”*

— Amartya Sen (Sen, 1981)

(“A fome é a característica de algumas pessoas não **terem** alimentos suficientes para comer. Não é a característica de não **haver** alimentos suficientes para comer.”)

— (Tradução livre)

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo de simulação econômica baseado em agentes para analisar o impacto da intervenção estatal na formação de preços e na disponibilidade de oferta no mercado interno de *commodities*, focado no contexto brasileiro de exportação de milho. Utilizando a plataforma JaCaMo, foi implementado um sistema multiagente composto por agentes Produtores, *Traders* (intermediários), Consumidores (mercado interno), Portos (exportação) e um agente Governamental. O modelo simula a dinâmica do mercado através de um mecanismo de leilão em duas fases, onde os *traders* compram dos produtores e revendem para os mercados interno e externo. O foco da análise é comparar dois cenários: um cenário padrão (*baseline*), sem a atuação de estoques reguladores, e um cenário de intervenção, onde o governo opera um estoque regulador, participando ativamente da compra e venda da *commodity* para garantir o abastecimento interno e mitigar a alta de preços. Os resultados, registrados em métricas como o lucro dos *traders*, volume de vendas interno/externo e o resultado (lucro/custo) da operação governamental, permitem avaliar as consequências de cada cenário. O trabalho oferece *insights* sobre o equilíbrio entre o lucro dos intermediários e a segurança do abastecimento nacional, especialmente no contexto de forte demanda de exportação isenta de impostos.

Palavras-chave: Inteligência Artificial. Sistemas Multiagentes. Economia Computacional. Simulação Baseada em Agentes. Intervenção Estatal. Estoque Regulador.

ABSTRACT

This work presents the development of an agent-based economic simulation model to analyze the impact of state intervention on price formation and supply availability in the domestic commodities market, focusing on the Brazilian corn export context. Using the JaCaMo platform, a multi-agent system was implemented, comprising Producer, Trader (intermediary), Consumer (domestic market), Port (export market), and Government agents. The model simulates market dynamics through a two-phase auction mechanism, where traders buy from producers and resell to domestic and export markets. The focus of the analysis is to compare two scenarios: a standard (baseline) scenario, without regulatory stocks, and an intervention scenario, where the government operates a regulatory stock mechanism, actively participating in buying and selling the commodity to ensure domestic supply and mitigate price hikes. The results, captured in metrics such as trader profit, domestic/export sales volume, and the government operation's result (profit/cost), allow for assessing the consequences of each scenario. The work offers insights into the trade-off between intermediary profits and national supply security, especially in the context of strong, tax-free export demand.

Keywords: Artificial Intelligence. Multi-Agent Systems. Computational Economics. Agent-Based Simulation. State Intervention. Regulatory Stock.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Diagrama de alto nível da arquitetura: sincronização, <i>logging</i> e mercado.	38
Figura 2	– Diagrama de alto nível da arquitetura da fase 1.	39
Figura 3	– Diagrama de alto nível da arquitetura da fase 2.	39
Figura 4	– Evolução do preço médio pago ao produtor (C1 vs. C2) em relação ao Preço Internacional.	52
Figura 5	– Comparativo temporal do preço médio pago pelos Consumidores (Doméstico) e Portos (Exportação) em ambos cenários.	53
Figura 6	– Volume total negociado no Mercado Doméstico vs. Exportação (C1 vs. C2). A barra do C2 inclui o estoque final do governo como parte do "Volume Doméstico".	54
Figura 7	– Variação temporal do estoque do governo_trader (C2) em relação ao Preço Internacional.	54
Figura 8	– Evolução do Lucro Líquido e Retorno sobre Investimento (ROI) dos <i>traders</i> privados (C1 vs. C2).	55
Figura 9	– Composição do Balanço Total do Governo no Cenário 2 (Impostos + Balanço <i>Trader 4</i> + Estoque Final).	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos trabalhos relacionados	32
--	----

LISTA DE CÓDIGOS

4.1	Lógica de formação de lance e atualização de crença	40
4.2	Lógica de determinação do vencedor (Vickrey)	43

LISTA DE SÍMBOLOS

IA	Inteligência artificial
ACE	Agent-based Computational Economics
CDI	Crenças-desejos-intenções
SMA	Sistemas multiagente
FAO	Food and Agriculture Organization
BDI	Belief-Desire-Intention
SBA	Simulação baseada em agentes
ROI	Retorno sobre investimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	OBJETIVO	27
2.1	OBJETIVO GERAL	27
2.1.1	Objetivos específicos	27
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
3.1	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E AGENTES INTELIGENTES	29
3.2	SISTEMAS MULTIAGENTES E ARQUITETURA	29
3.2.1	Modelo BDI (Belief-Desire-Intention)	30
3.2.2	A Abordagem Multidimensional (Agente, Ambiente e Organização)	30
3.3	SIMULAÇÃO ECONÔMICA BASEADA EM AGENTES	31
3.4	CONCEITOS ECONÔMICOS DO MODELO	31
3.5	TRABALHOS RELACIONADOS	31
4	O MODELO ECONÔMICO PROPOSTO	37
4.1	INTRODUÇÃO	37
4.2	ARQUITETURA DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	37
4.3	DEFINIÇÃO DOS AGENTES	38
4.3.1	Agente Governo (Governo)	38
4.3.2	Agente Produtor (Produtor)	38
4.3.3	Agente Comerciante Padrão (Trader)	39
4.3.4	Agentes Compradores (Consumidor e Porto)	41
4.4	PROTOCOLOS DE INTERAÇÃO E FASES DA SIMULAÇÃO	42
4.4.1	Protocolo de Leilão (Vickrey)	42
4.4.2	Ciclo de Vida da Simulação (Sincronização)	44
4.4.2.1	<i>Fase 1: Produção e Leilão de Compra (Produtores → Traders)</i>	44
4.4.2.2	<i>Fase 2: Venda no Mercado (Traders → Compradores)</i>	44
4.4.2.3	<i>Fase 3: Coleta de Impostos e Geração de Logs</i>	45
4.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	45
5	EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	47
5.1	INTRODUÇÃO	47
5.2	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	47
5.2.1	Dados de Entrada e Fontes	47
5.2.1.1	<i>Nota Metodológica sobre Unidades</i>	48
5.2.2	Parâmetros Gerais da Simulação	48
5.2.3	Métricas Coletadas	49

5.3	CONFIGURAÇÃO DOS CENÁRIOS EXPERIMENTAIS	49
5.3.1	Cenário 1: Modelo Econômico Base	50
5.3.1.1	<i>Lógica de Aprendizado Adaptativo (Learning Rate)</i>	50
5.3.2	Cenário 2: Inclusão do Agente Comerciante Governamental	51
5.4	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	51
5.4.1	Impacto no Preço do Milho	51
5.4.2	Impacto no Volume e Abastecimento do Mercado	53
5.4.3	Impacto na Performance dos <i>Traders</i> Privados	55
5.4.4	Análise do Balanço Governamental	56
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	58
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	59
6.1	CONCLUSÃO	59
6.2	TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE E ORIENTAÇÕES DE USO	63
	APÊNDICE B – ARTIGO CIENTÍFICO	65

1 INTRODUÇÃO

É fato que o progresso da capacidade de processamento de computadores, seja de dispositivos individualmente ou mesmo a escalabilidade de grandes redes de computação em nuvem, oportuniza, ao longo dos anos, ampliação de novas áreas de aplicação da tecnologia, antes inviáveis. Assim como o processamento, a disponibilidade de dados sobre o mundo aumentou consideravelmente nos últimos anos, graças, por exemplo, ao fenômeno “Internet das coisas” (Berisha; Mëziu; Shabani, 2022). Tamanha variedade e volume de oferta de dados e a possibilidade de processá-los com maior velocidade significa que programas mais complexos, com mais variáveis e mais dados se tornam viáveis. Nesse contexto inovador, a área da inteligência artificial se destaca como interessante aos estudos, já que ela pode ser definida como o design e a construção de agentes inteligentes que recebem percepções do ambiente e realizam ações que afetam esse ambiente (Russell; Norvig, 2020). Tal aplicabilidade evidencia-se pela utilização de sistemas multiagentes, uma das principais áreas de pesquisa em inteligência artificial na contemporaneidade. Um agente é um sistema reativo que exhibe algum grau de autonomia no sentido de delegarmos alguma tarefa a ele, e ao invés de ser dito detalhadamente como alcançar o objetivo, o próprio sistema determina a melhor forma de realizar uma tarefa (Bordini; Hübner; Wooldridge, 2007). Esses agentes podem, além disso, mudar suas crenças (mecanismo pelo qual os agentes se governam) à medida que o programa, ou a simulação nesse caso, executa. Assim, usando técnicas de aprendizado de máquina os agentes podem com o passar do tempo melhor se adaptarem ao ambiente em que estão inseridos.

Quanto à sua natureza, simulações de sistemas multi-agentes podem “imitar” cenários do mundo real, como redes sociais. Nessas simulações, os agentes são heterogêneos com diferentes atributos, comportamentos e regras, que podem diferir de várias maneiras (rede social, preferências individuais) e ao longo do tempo. Por exemplo, pode-se modelar grupos de moradores em um bairro específico, mas esses indivíduos podem ter características heterogêneas como idade, sexo, renda e preferências de vida, embora estejam associados ao mesmo grupo.

Uma área de interesse de aplicação de sistemas multiagente é a área da economia. No mundo real, os indivíduos são influenciados pelo sistema e por outros indivíduos enquanto esses mesmos indivíduos também influenciam o sistema, podendo tal comportamento ser modelado por um sistema e executado por um computador. Um exemplo é o *AI Economist*, que se propõe a desenvolver um projeto de política tributária utilizando sistemas multi-agente (Zheng et al., 2022). Existem experiências empíricas de políticas econômicas que são estudadas por especialistas, mas há um limite de informações disponíveis, uma vez que a espécie humana existe há cerca de 300.000 anos, e os nossos registros históricos datam de menos tempo de vida ainda, aproximadamente 5.000 anos. Logo, nossa base de dados é severamente limitada pela própria história humana.

No entanto, ainda que haja determinada limitação, estudos de economia muito se beneficiaram de modelos criados a fim de replicar o comportamento humano e seus efeitos na

economia, principalmente na interação entre a microeconomia (os agentes representando indivíduos e firmas) e a macroeconomia (taxas de juros, impostos e gastos do governo para regular o crescimento e a estabilidade de uma economia). Enfim, técnicas clássicas de estudo da economia e de experimentos podem ser melhoradas pelo uso de sistemas multiagentes devido às possibilidades de simular vários cenários simultaneamente, melhorando muito a eficiência de um sistema.

Portanto, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma simulação de cadeia produtiva fundamentada em agentes, representando produtores, consumidores, intermediários e uma entidade governamental operando um mecanismo de estoque regulador. O objetivo central é demonstrar os efeitos dessa intervenção na formação de preços e na disponibilidade de alimentos para o mercado interno, contrastando esses resultados com um cenário de livre mercado voltado à exportação. Para viabilizar a modelagem da complexidade dessas interações econômicas e sociais, o trabalho utiliza a plataforma JaCaMo, permitindo a construção de agentes autônomos inseridos em um ambiente de mercado dinâmico.

É importante ressaltar que este trabalho adota uma perspectiva interdisciplinar. Embora utilize a engenharia de Sistemas Multiagentes como alicerce tecnológico indispensável, o foco primário da pesquisa reside na Economia Computacional. A construção da arquitetura de agentes e a implementação na plataforma JaCaMo servem, assim, como o meio instrumental para possibilitar a exploração e a análise dos fenômenos econômicos emergentes e dos *trade-offs* das políticas de intervenção nos cenários propostos.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um modelo de simulação baseado em agentes (SMA) que sirva como ferramenta experimental para a geração de cenários econômicos. Através desta ferramenta, busca-se avaliar os impactos e *trade-offs* da introdução de uma política de intervenção governamental, especificamente via mecanismo de estoque regulador, no mercado brasileiro de milho. O intuito é testar a hipótese de que a atuação ativa do Estado na compra e venda da *commodity* é capaz de reduzir a volatilidade de preços e garantir a disponibilidade de oferta no mercado interno, mitigando os efeitos da forte demanda de exportação.

2.1.1 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo principal e verificar a hipótese proposta, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um ambiente de simulação multiagente na plataforma JaCaMo que represente os conflitos de interesse entre os principais atores da cadeia: Produtores, *Traders* (que buscam maximizar lucro via exportação) e Consumidores Domésticos (que necessitam de abastecimento acessível).
- Modelar os protocolos de interação de mercado utilizando o mecanismo de Leilão Vickrey. A escolha deste tipo específico de leilão, em detrimento de outros modelos (como leilão inglês ou holandês), deve-se às suas propriedades teóricas de incentivo à revelação do valor real ("*truth-telling*"), conforme será detalhado e justificado no Capítulo 4.
- Estabelecer um Cenário 1 (*baseline*) que represente a dinâmica atual de livre mercado, caracterizada pela ausência de impostos de exportação e pela livre atuação de intermediários.
- Projetar um Cenário 2 (intervenção) que introduza um agente governamental operando um estoque regulador, com regras de negócio focadas exclusivamente na proteção do mercado interno (compra para estocagem e venda apenas domesticamente).
- Realizar uma análise comparativa dos resultados para identificar se a intervenção gerou os "melhores resultados" sociais esperados, avaliando especificamente:
 - A redução no preço médio pago pelo consumidor doméstico;
 - O aumento na disponibilidade (volume) de milho para a indústria nacional;

- O impacto (redução) no volume exportado;
- Os custos fiscais e operacionais para o governo manter essa política.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais que servem de alicerce para o desenvolvimento deste trabalho. As seções a seguir abordam desde os princípios da Inteligência Artificial e dos Sistemas Multiagentes, com foco na arquitetura BDI e na abordagem multidimensional, até a plataforma tecnológica utilizada e os conceitos econômicos que norteiam a simulação proposta.

3.1 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E AGENTES INTELIGENTES

A Inteligência Artificial (IA) é uma área da ciência da computação dedicada à criação de sistemas computacionais que exibem comportamentos que seriam considerados inteligentes se fossem realizados por seres humanos. Dentro deste vasto campo, o conceito de agente inteligente ocupa uma posição central.

Um agente pode ser definido como qualquer entidade que é capaz de perceber seu ambiente através de sensores e de atuar sobre esse ambiente através de atuadores (Russell; Norvig, 2020). A característica distintiva de um agente inteligente reside em sua capacidade de agir de forma autônoma e flexível para atingir seus objetivos. De acordo com (Wooldridge, 2009), essa flexibilidade é manifestada através de quatro propriedades chave:

- **Autonomia:** Agentes operam sem a intervenção direta de humanos ou outros sistemas e possuem controle sobre suas próprias ações e estado interno.
- **Reatividade:** Agentes são capazes de perceber seu ambiente e responder em tempo hábil às mudanças que ocorrem nele.
- **Proatividade:** Agentes não apenas reagem ao ambiente, mas são capazes de exibir um comportamento direcionado a objetivos, tomando a iniciativa para satisfazer suas metas.
- **Sociabilidade:** Agentes são capazes de interagir e se comunicar com outros agentes (e possivelmente humanos) a fim de atingir seus próprios objetivos ou para cooperar na resolução de metas coletivas.

3.2 SISTEMAS MULTIAGENTES E ARQUITETURA

Um Sistema Multiagentes (SMA) é um sistema composto por uma coleção de agentes inteligentes que interagem em um ambiente compartilhado. A essência de um SMA reside no fato de que o comportamento global do sistema emerge das interações locais e das decisões autônomas de seus componentes (Wooldridge, 2009).

3.2.1 Modelo BDI (Belief-Desire-Intention)

Para implementar o raciocínio complexo necessário em simulações econômicas, utiliza-se frequentemente a arquitetura BDI. Inspirada na filosofia da ação prática, esta abordagem modela o estado interno do agente através de três componentes mentais principais (Bordini; Hübner; Wooldridge, 2007):

- **Crenças (*Beliefs*):** Representam o conhecimento que o agente possui sobre o mundo e sobre si mesmo. Diferente de conhecimento absoluto, crenças podem ser incompletas ou incorretas e mudam ao longo do tempo.
- **Desejos (*Desires*) ou Objetivos (*Goals*):** Representam os estados que o agente deseja alcançar.
- **Intenções (*Intentions*):** São os desejos com os quais o agente se comprometeu a realizar através de um plano de ação específico.

Esta arquitetura é fundamental para este trabalho, pois permite que os agentes *traders* e produtores não apenas reajam a preços, mas planejem estratégias de longo prazo baseadas em suas crenças de mercado.

3.2.2 A Abordagem Multidimensional (Agente, Ambiente e Organização)

Além da complexidade individual do agente, SMAs modernos são compreendidos sob uma ótica multidimensional. Segundo a abordagem de engenharia utilizada na plataforma JaCaMo (Boissier, 2013), um sistema não é apenas um conjunto de agentes, mas a integração de três dimensões de primeira classe:

1. **Agentes:** As entidades proativas e autônomas (implementadas em Jason).
2. **Ambiente:** O meio onde os agentes situam-se e atuam, fornecendo recursos e ferramentas. No modelo proposto, o ambiente é manipulado através de artefatos (conceito da tecnologia CArtaG0), como os mecanismos de leilão.
3. **Organização:** As regras, grupos e papéis que definem as normas de conduta e as expectativas sociais dos agentes (gerenciado por Moise).

Essa distinção teórica é vital para entender como o modelo proposto separa a lógica de decisão econômica (Agente) das regras de mercado e leilão (Ambiente).

3.3 SIMULAÇÃO ECONÔMICA BASEADA EM AGENTES

A Economia Computacional Baseada em Agentes (ACE, do inglês *Agent-based Computational Economics*) é um campo de pesquisa que estuda sistemas econômicos como SMAs dinâmicos compostos por agentes que interagem. Diferente das abordagens econômicas tradicionais, que frequentemente dependem de agentes representativos e da suposição de um equilíbrio de mercado, a ACE adota uma perspectiva de baixo para cima (*bottom-up*) (Tesfatsion; Judd, 2006).

Nesta abordagem, os fenômenos macroeconômicos, como a formação de preços de mercado ou a ocorrência de bolhas especulativas, são vistos como propriedades emergentes. Eles não são programados explicitamente no modelo, mas surgem das interações e decisões de uma população de agentes heterogêneos e autônomos. Isso torna a ACE uma ferramenta poderosa para explorar a dinâmica de sistemas econômicos complexos e para testar os efeitos de diferentes políticas em um ambiente controlado.

3.4 CONCEITOS ECONÔMICOS DO MODELO

Para a correta compreensão da simulação desenvolvida neste trabalho, é necessária a definição de alguns conceitos econômicos chave. O mercado é entendido como o ambiente abstrato onde ocorrem as trocas comerciais entre produtores e consumidores. A simulação distingue entre o mercado interno, que representa as vendas dentro de uma fronteira econômica, e o mercado de exportação, que representa as vendas para o exterior.

As interações são governadas pelas forças de oferta, a quantidade de um bem que os produtores desejam vender a um determinado preço, e demanda, a quantidade que os consumidores desejam comprar. A política fiscal, por sua vez, representa a intervenção de uma entidade governamental na economia, sendo a tributação (aplicação de impostos) uma de suas principais ferramentas, utilizada para arrecadar receita e influenciar o comportamento dos agentes econômicos.

3.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta análise comparativa de artigos focados em Simulação Baseada em Agentes (SBA), várias dimensões importantes são examinadas. A Tabela 1 sumariza as características dos trabalhos estudados.

Identificamos as estruturas ou linguagens de programação específicas usadas para simulação, como *NetLogo*¹ ou *AnyLogic*², pois essas ferramentas influenciam significativamente

¹ *NetLogo*: Ambiente de modelagem multiagente programável. Disponível em: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>

² *AnyLogic*: Software de simulação multimétodo. Disponível em: <https://www.anylogic.com/>

os recursos de modelagem.

A coluna "Tipo" na tabela utiliza a seguinte legenda para categorizar a abordagem da pesquisa:

- **1:** Estudo Quantitativo (baseado em dados numéricos e estatística);
- **2:** Estudo Qualitativo (focado na compreensão de comportamentos e fatores contextuais).

Tabela 1 – Comparação dos trabalhos relacionados

Fonte	Quant.	vs	Domínio	Ferramentas	Conjunto de dados	Métricas de avaliação
Rosis and Mesquita 2018	1 e 2		Econômico	Não	Valida os resultados da simulação em relação a dados históricos, como exportações, balanços de grãos e taxas de utilização do setor de processamento.	Utilização das fábricas de processamento de soja, congestionamentos nos portos e o caráter sazonal do sistema.

(Continua na próxima página)

(Continuação da Tabela ??)

Fonte	Quant.	vs	Domínio	Ferramentas	Conjunto de dados	Métricas de avaliação
Elkamel et al. 2023	1		Ambiental e Social	Não	Valida os resultados com base em dados reais do Censo da Sociedade de Agricultura Urbana de Vancouver	Redução do desperdício de alimentos, disponibilidade de alimentos, geração de energia renovável, emissões de carbono evitadas e métricas de sustentabilidade social
Ge et al. 2021	1		Econômico, social e ambiental	NetLogo	Valida seus resultados de simulação em relação aos dados do mundo real dos balanços alimentares da FAO	Suficiência de nutrientes, volumes de comércio e equilíbrio da ingestão de alimentos entre países
Li and Wang 2023	1		Econômico	Não	Não menciona explicitamente a validação com base em dados do mundo real	Preços de transação, quantidades de produtos e bem-estar social.

(Continua na próxima página)

(Continuação da Tabela ??)

Fonte	Quant. Qual.	vs	Domínio	Ferramentas	Conjunto de dados	Métricas de avaliação
Hakrama and Frasheri 2018	2		Econômico	JaCaMo	Não menciona explicitamente a validação com base em dados do mundo real	Resultados econômicos e o comportamento geral da economia artificial
Dharmapriya et al. 2019	1		Gerenciamento da cadeia de suprimentos	MAOM and NSGA-II	Testa o modelo proposto usando um estudo de caso de uma rede de fornecimento de refrigeradores da literatura	Desempenho em nível de rede de suprimentos, a robustez contra interrupções e a adequação das configurações para perfis distintos de produtos e mercados.
Kumar and Srinivasan 2010	2		Gerenciamento da cadeia de suprimentos	Não	Analisa a literatura e as abordagens existentes na área	Eficiência, redução de custos e qualidade de serviço em cadeias de suprimentos

(Continua na próxima página)

(Continuação da Tabela ??)

Fonte	Quant. Qual.	vs	Domínio	Ferramentas	Conjunto de dados	Métricas de avaliação
Jumadinova and Dasgupta 2015	1		Mercados de previsão e sistemas de negociação automatizados	Não	Usa dados reais do mercado de previsão da Intrade para validar o modelo proposto	Precisão da previsão de preços, a utilidade obtida pelos agentes e a comparação com as estratégias de negociação existentes
Happe 2004	1		Economia agrícola	Framework do Simulador de Política Agrícola (AgriPoliS)	Dados de fazendas, estatísticas regionais e dados de investimento	Eficiência estrutural, efeitos na renda e o impacto de diferentes tipos de políticas no comportamento das fazendas e na dinâmica agrícola regional

(Continua na próxima página)

(Continuação da Tabela ??)

Fonte	Quant. Qual.	vs	Domínio	Ferramentas	Conjunto de dados	Métricas de avaliação
Krejci 2014	1		Gerenciamento da cadeia de fornecimento de alimentos	NetLogo	Não se baseia em um conjunto de dados específico	Coordenação entre agências, taxas de preenchimento do sistema, relações entre oferta e demanda e resultados gerais de sustentabilidade

A exploração de Simulações Baseadas em Agentes (SBA) na modelagem da cadeia de suprimentos é um campo em rápida evolução. Os estudos analisados destacam a versatilidade da SBA, desde os impactos da política tributária na cadeia de soja brasileira até a agricultura urbana. À medida que desenvolvo meu próprio modelo de simulação, esses conhecimentos serão fundamentais para moldar minha análise, especialmente no uso de ferramentas como o *JaCaMo*, citado por Hakrama e Frasher (2018), para orquestrar a complexidade econômica.

4 O MODELO ECONÔMICO PROPOSTO

4.1 INTRODUÇÃO

Para investigar as dinâmicas do mercado brasileiro de milho, especificamente a tensão entre o abastecimento doméstico e a atratividade da exportação, foi desenvolvido um modelo de simulação econômica. Este capítulo detalha a construção e os fundamentos técnicos deste modelo. Cabe notar que a engenharia do sistema foi projetada para servir à experimentação econômica; portanto, as decisões arquiteturais priorizam a representatividade dos fenômenos de mercado em detrimento de puras otimizações de software.

O foco aqui não é a experimentação (reservada ao Capítulo 5), mas sim a definição da arquitetura, dos agentes e das regras que compõem o ambiente de simulação base. A plataforma escolhida para este desenvolvimento foi o JaCaMo, por sua robustez na implementação de sistemas multiagentes que integram autonomia (Jason), ambiente (CArtAgO) e organização (Moise).

A estrutura deste capítulo segue uma abordagem *bottom-up*, construindo o modelo passo a passo para o leitor. A Seção 4.2 inicia com a arquitetura geral da simulação, descrevendo como os componentes do JaCaMo são utilizados. Em seguida, a Seção 4.3 define os agentes que compõem o cenário de *baseline*: o Agente Produtor, o Agente Comerciante Padrão (*Trader*) e o Agente Monitor. A Seção 4.4 detalha a "cola" que une esses agentes: os protocolos de interação, com foco no Leilão Vickrey, e o ciclo de vida que sincroniza as fases da simulação. Por fim, a Seção 4.5 apresenta as considerações finais deste capítulo.

4.2 ARQUITETURA DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

A implementação dos experimentos foi realizada utilizando a plataforma JaCaMo, que integra as dimensões de Agentes (Jason), Ambiente (CArtAgO) e Organização (Moise). No entanto, para o escopo deste trabalho, optou-se por uma abordagem focada primariamente na interação Agente-Ambiente. Embora a dimensão organizacional (Moise) ofereça recursos poderosos para a especificação de normas e grupos, a coordenação neste modelo foi implementada através de mecanismos de sincronização via artefatos (CArtAgO) e protocolos de interação implícitos. A formalização completa da camada organizacional utilizando especificações Moise (.xml) é reconhecida como uma extensão natural para trabalhos futuros, visando maior robustez normativa.

A arquitetura do sistema é, portanto, centralizada em artefatos CArtAgO que gerenciam a interação e a sincronização. A Figura 1 ilustra esta arquitetura em alto nível. Um artefato principal, o *Artifact Coordenador*, é observado por todos os agentes e gerencia o fluxo de tempo e as fases da simulação. Os leilões das duas fases do mercado são também mediados por artefatos CArtAgO.

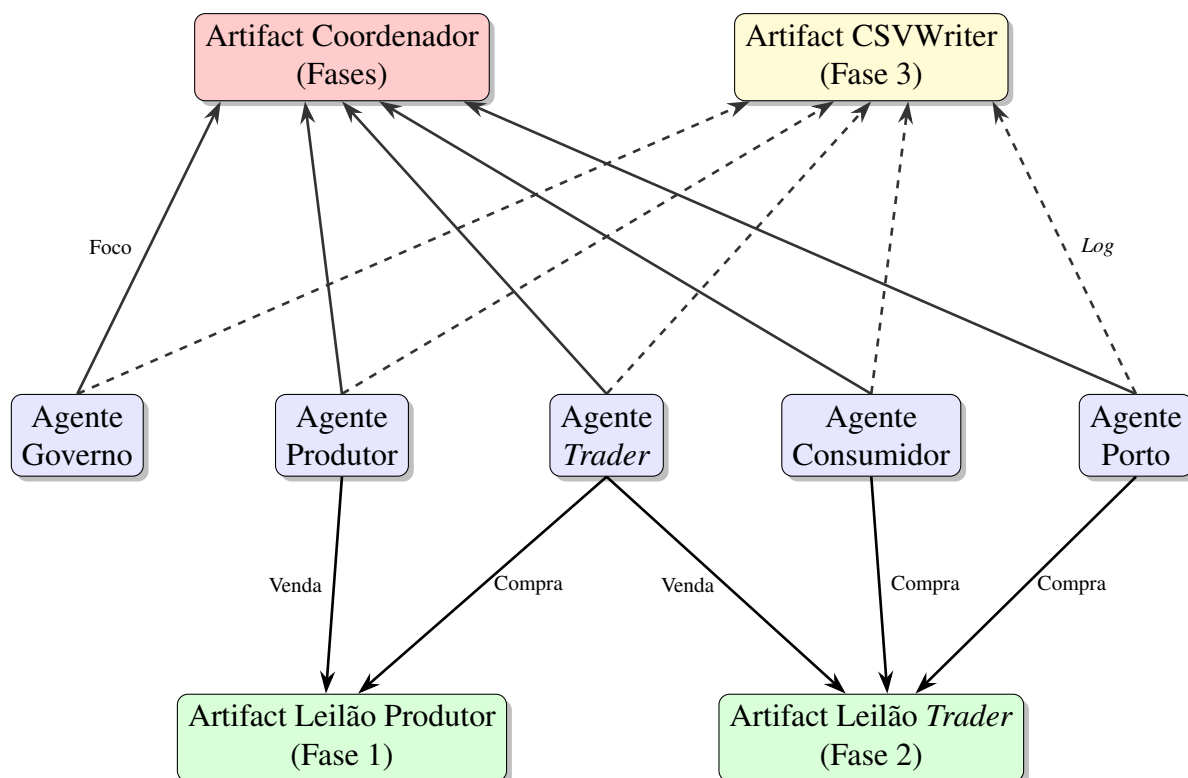


Figura 1 – Diagrama de alto nível da arquitetura: sincronização, logging e mercado.

4.3 DEFINIÇÃO DOS AGENTES

O sistema é composto por um conjunto de agentes que representam os principais atores da cadeia de suprimentos do milho, conforme descrito a seguir.

4.3.1 Agente Governo (Governo)

O agente Governo (implementado como `governo.asl`) atua estritamente como a infraestrutura de orquestração da simulação. É fundamental distinguir este agente arquitetural do “Agente Comerciante Governamental” (ou Estoque Regulador) que será introduzido apenas no Cenário 2 como um ator econômico. O Agente Governo descrito aqui não participa do mercado (não compra nem vende milho); sua função é gerenciar o avanço do tempo na simulação e orquestrar as fases do mercado (Fase 1, Fase 2, Fase 3), garantindo que os demais agentes estejam sincronizados em suas ações. As políticas tributárias do modelo (taxas de imposto) não são difundidas ativamente por este agente, mas sim configuradas como crenças estáticas iniciais nos agentes relevantes.

4.3.2 Agente Produtor (Produtor)

Os agentes `produtor_estado.asl` representam a oferta de milho. O modelo implementa uma população destes agentes, onde cada um pode representar um estado produtor

(como Mato Grosso, Paraná, etc.). A função primordial desses agentes é calcular a produção diária de milho, baseando-se em uma média simples de dados históricos de produção anual. Na Fase 1 da simulação, cada produtor inicia um leilão (detalhado na Seção 4.4.1) para vender sua produção do dia.

4.3.3 Agente Comerciante Padrão (*Trader*)

A intermediação entre produtores e compradores finais é realizada pelos agentes *Trader* Padrão (implementados pelo arquivo `trader_1.asl`). Estes agentes operam com o objetivo principal de maximizar seu lucro, atuando em ambas fases do mercado. A estratégia de atuação destes agentes é dividida da seguinte forma:

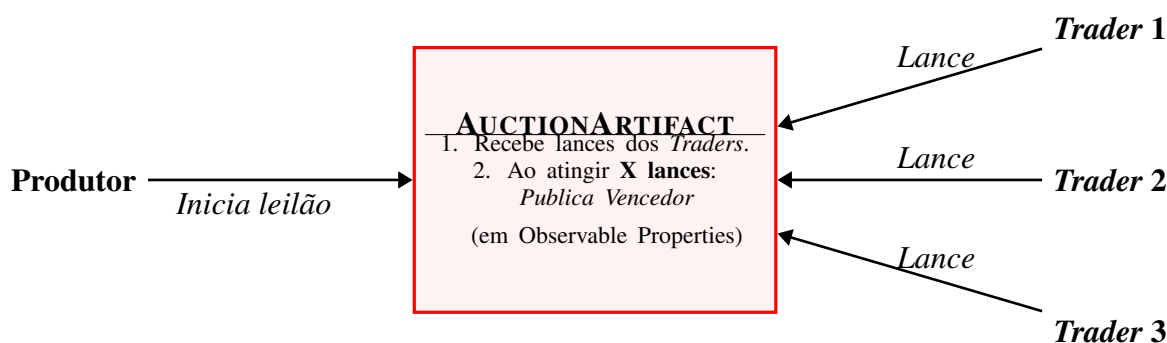


Figura 2 – Diagrama de alto nível da arquitetura da fase 1.

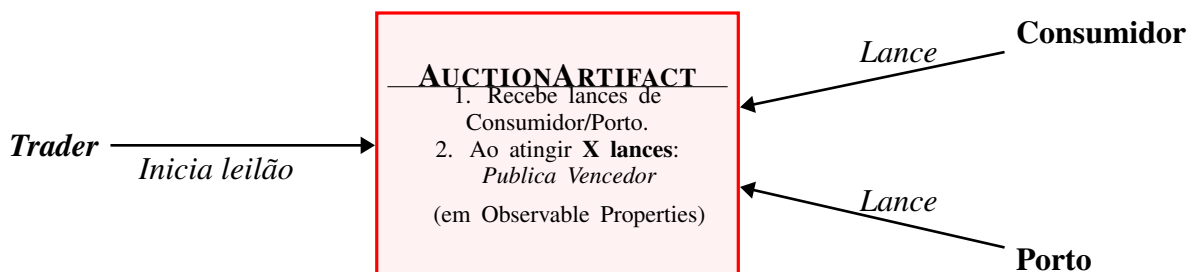


Figura 3 – Diagrama de alto nível da arquitetura da fase 2.

- **Fase 1 (Compra):** Na primeira fase, os *traders* participam como compradores. Para definir seu lance, o agente não olha apenas para o passado, mas avalia a oportunidade atual. Ele calcula uma "Receita Alvo" (*Target Revenue*) considerando o maior lucro potencial entre a revenda no mercado doméstico (P_{dom}) e no mercado internacional (P_{intl}). Sua expectativa de preço de revenda é ajustada dinamicamente, ponderando sua crença anterior com essa nova oportunidade, através de um mecanismo de aprendizado adaptativo.
- **Fase 2 (Venda):** Na segunda fase, os *traders* atuam como vendedores. Eles adotam uma política de *venda imediata*, iniciando leilões para liquidar todo o estoque (Stock) adqui-

rido na Fase 1. Suas ofertas são direcionadas tanto a compradores domésticos quanto internacionais, buscando a liquidez imediata.

A arquitetura BDI deste agente utiliza crenças iniciais para modular seu comportamento. O Código 4.1 demonstra a sofisticação desse processo decisório. Diferente de um agente reativo simples, o *trader* atualiza sua crença de revenda (*my_resale_belief*) misturando sua memória histórica com a cotação internacional do dia, subtrai seus custos operacionais e, por fim, adiciona um pequeno fator aleatório (Epsilon) para simular a imperfeição e o ruído natural de agentes humanos no mercado.

```
+task(D)[artifact_id(AId)] : running("yes")[artifact_id(AId)] &
my_cost(C) &
my_learning_rate(W_new) &
my_resale_belief(E_old) &
p_domestic_max(P_dom) &
p_domestic_tax_rate(T_dom) &
p_export_tax_rate(T_exp) &
p_intl_today(P_intl)
<-
.my_name(MyName);
// 1. Calcula Receita Alvo (Qual a melhor oportunidade hoje?)
Dom_Revenue = P_dom * (1.0 - T_dom);      // ex: 90 * 0.88 = 79.2
Intl_Revenue = P_intl * (1.0 - T_exp);    // ex: 120 * 1.0 = 120

// O alvo e o melhor preco que o mercado oferece hoje
Target_Revenue = math.max(Dom_Revenue, Intl_Revenue);

// 2. Atualiza Crenca Adaptativa (Mistura memoria com dado
    atual)
W_old = 1.0 - W_new;
E_new = (E_old * W_old) + (Target_Revenue * W_new);

// E_new e a nova estimativa de valor para esta rodada
+my_resale_belief(E_new);

// 3. Calcula Valor Real (Desconta Custos)
V_true = E_new - C;

// 4. Adiciona Fator Estocastico (Epsilon)
// Simula ruido de mercado ou imperfeicao do agente
.random(R); // R entre 0.0 e 1.0
Epsilon = (R * 0.5) - 0.25; // Escala R para +/- 0.25
```

```
MyBid = V_true + Epsilon;
bid(MyBid)[artifact_id(AId)].
```

Código 4.1 – Lógica de formação de lance e atualização de crença

Conforme definido em suas crenças iniciais, estes agentes são submetidos à tributação, pagando impostos sobre suas operações (ex: `p_domestic_tax_rate(0.12)` para vendas domésticas) e incorrem em um custo operacional (ex: `my_cost(5.0)`) em suas transações.

É importante notar que, embora todos os *traders* padrão sigam esta mesma lógica de `trader_1.asl`, a simulação utiliza uma população heterogênea. As configurações específicas de seus parâmetros (como `my_cost` e `my_learning_rate`), que simulam diferentes perfis de risco (ex: conservador versus agressivo), serão detalhadas na configuração do Cenário 1 (Seção 5.3.1), pois fazem parte do delineamento experimental.

4.3.4 Agentes Compradores (Consumidor e Porto)

Os compradores finais são representados por dois tipos de agentes, Consumidor e Porto (implementados por `consumidor_industria.asl` e `porto.asl` respectivamente). Ambos participam apenas da Fase 2 (leilões dos *traders*), competindo para comprar o milho ofertado. Embora seus ciclos de vida e formas de interação com os artefatos de leilão sejam semelhantes, suas lógicas de decisão e objetivos são fundamentalmente diferentes, refletindo suas distintas funções no mercado.

- **Agente Consumidor:** Simula a demanda interna (ex: indústrias de ração animal), cujo objetivo é comprar milho para consumo próprio. Sua estratégia é baseada em um modelo de agressividade. O agente possui um teto de preço interno (`my_max_price`). Seu lance é calculado multiplicando esse teto por um fator de agressividade (ex: $Lance = V_true \times Total_Aggro$), mas é sempre limitado pelo valor máximo de `my_max_price`. Isso reflete a necessidade de garantir o suprimento para a produção, comprando de forma agressiva até o seu limite.
- **Agente Porto:** Simula a demanda de exportação. Seu objetivo não é o consumo, mas a revenda com lucro no mercado internacional. Sua estratégia é baseada em um modelo de margem. O agente usa o preço internacional do dia (`p_intl_today`) como sua referência de valor (`V_true`). Seu lance é calculado subtraindo uma margem de lucro dessa referência (ex: $Lance = V_true \times (1 - Total_Margin)$). Isso garante que o porto só compre o milho se puder revendê-lo com rentabilidade.

Essa distinção é crucial: o Consumidor compete agressivamente até seu teto para garantir o suprimento, enquanto o Porto compete de forma conservadora para garantir sua margem de lucro na exportação.

4.4 PROTOCOLOS DE INTERAÇÃO E FASES DA SIMULAÇÃO

Esta seção detalha os mecanismos que permitem aos agentes interagir e que governam o progresso da simulação. O modelo é centrado em dois componentes principais: um protocolo de leilão específico, que media todas as transações, e um ciclo de vida de simulação baseado em fases, que é orquestrado pelo Agente Governo.

4.4.1 Protocolo de Leilão (Vickrey)

O mecanismo central de comércio em ambas as fases do mercado é o Leilão Vickrey (ou leilão de segundo preço). Neste modelo, o vencedor é o agente que submete o maior lance, mas o preço pago não é o seu próprio lance, e sim o valor do segundo maior lance distinto. Caso haja apenas um lance, o preço pago é o preço mínimo (base) definido pelo vendedor. Esta abordagem foi escolhida pois, teoricamente, incentiva os agentes a darem lances que refletem sua valoração real (ou "lance honesto").

É crucial notar que a interação do leilão não ocorre através de mensagens diretas entre os agentes (como broadcast ou tell). Em vez disso, a interação é mediada por um artefato CArAg0 (AuctionArtifact.java). O fluxo de interação com o artefato é o seguinte:

1. Um agente vendedor (Produtor na Fase 1, *Trader* na Fase 2) inicia o leilão chamando uma operação no artefato (ex: `startProducerAuction(...)`) e define o número de lances esperados (`expected_bids`) com base no número de agentes participantes.
2. O artefato muda sua propriedade observável `running` para "yes".
3. Os agentes compradores (que "focam" no artefato) reagem a essa mudança e submetem seus lances usando a operação `bid(ValorDoLance)`. O artefato armazena internamente apenas o maior lance de cada agente.
4. Quando o número de lances recebidos (`bid_count`) é igual ao esperado, o artefato atualiza `bids_finished` para "yes".
5. O agente vendedor, observando esta mudança, chama a operação `stop()` no artefato.
6. O artefato executa sua lógica interna `calculateVickreyWinner()`, determinando o vencedor e o preço. Em seguida, publica os resultados nas propriedades observáveis `winner` e `price`.
7. Os agentes envolvidos (vendedor e vencedor) leem estas propriedades e procedem com a conclusão da transação (transferência de estoque, pagamento, etc.).

O Código 4.2 apresenta a implementação Java do artefato responsável pelo cálculo do vencedor, utilizando um conjunto ordenado (*TreeSet*) para determinar o segundo maior preço distinto.

```

private void calculateVickreyWinner() {
    if (allBids.isEmpty()) {
        // Nenhum lance recebido
        currentWinner = "no_winner";
        currentPrice = minimumPrice;
        return;
    }

    // Coletar todos os lances unicos e ordena-los em ordem
    decrescente
    Set<Double> uniqueBids = new
        TreeSet<>(Collections.reverseOrder());
    uniqueBids.addAll(allBids.values());

    // Encontrar o maior lance e seu agente
    double highestBid = uniqueBids.iterator().next();
    String winner = null;
    for (Map.Entry<String, Double> entry : allBids.entrySet()) {
        // Usar Double.compare para comparacao segura de doubles
        if (Double.compare(entry.getValue(), highestBid) == 0) {
            winner = entry.getKey();
            break; // Pega o primeiro agente com o maior lance
        }
    }

    currentWinner = winner;

    // Calcular preco Vickrey (segundo maior lance distinto)
    if (uniqueBids.size() == 1) {
        // Caso especial: apenas um lance unico (todos os
        lances sao iguais ou apenas um agente)
        // Usar preco minimo conforme especificado
        currentPrice = minimumPrice;
    } else {
        // Pegar o segundo maior lance distinto
        Iterator<Double> it = uniqueBids.iterator();
        it.next(); // Pular o maior
        currentPrice = it.next(); // Segundo maior
    }
}

```

```

    }
}

```

Código 4.2 – Lógica de determinação do vencedor (Vickrey)

4.4.2 Ciclo de Vida da Simulação (Sincronização)

O tempo na simulação progride em um ciclo diário, que é dividido em três fases principais. A coordenação e sincronização deste ciclo são gerenciadas pelo Agente Governo através de operações e propriedades observáveis no Artifact Coordenador.

A sincronização é gerenciada por um sistema de contadores no artefato coordenador (ex: `agents_ready_for_phase_1`, `agents_done_with_phase_1`). Os agentes utilizam operações de incremento (como `incrementAgentsDoneWithPhase1`) para sinalizar ao coordenador que completaram suas tarefas. O Agente Governo observa esses contadores e só avança para a fase seguinte quando o número esperado de agentes sinalizou a conclusão, garantindo que nenhum agente fique para trás.

O ciclo diário se desenrola da seguinte forma:

4.4.2.1 Fase 1: Produção e Leilão de Compra (*Produtores* → *Traders*)

Após o Governo sinalizar o início do dia (via `start_day(Day)`), ele avança para a Fase 1 (atualizando `current_phase = 1`).

- Os Produtores calculam sua produção diária e iniciam seus leilões (via `AuctionArtifact`) para vender seu estoque.
- Os Traders (Padrão e, no Cenário 2, o Governamental) reagem aos leilões, calculam seus lances e os submetem.
- Os leilões são resolvidos, e os *traders* vencedores recebem o milho em seu estoque. Os produtores sinalizam ao coordenador que terminaram.

4.4.2.2 Fase 2: Venda no Mercado (*Traders* → *Compradores*)

Quando todos os produtores terminam a Fase 1, o Governo avança o estado para `current_phase = 2`.

- Os Traders (Padrão e Governamental) que possuem estoque iniciam seus próprios leilões para revendê-lo.
- Os Consumidores (indústria) e Portos (exportação) competem nesses leilões, cada um com sua lógica de lance (agressividade vs. margem).

- Os leilões são resolvidos. Os *traders* recebem o pagamento e enviam o imposto devido (via `tax_payment`) ao Agente Governo.
- Os *traders* sinalizam ao coordenador que terminaram seus leilões de venda.

4.4.2.3 Fase 3: Coleta de Impostos e Geração de Logs

Quando todos os leilões de *traders* são concluídos, o Governo avança para a Fase 3 (*Logging*).

- O Governo envia um *broadcast* `log_day` para todos os agentes.
- Cada agente (Produtor, *Trader*, Consumidor, Porto e Governo) escreve suas métricas diárias (lucro, estoque, impostos, etc.) em seus respectivos arquivos CSV (detalhadas na seção 5.2.3).
- Após o log, os agentes sinalizam ao coordenador que estão prontos para o próximo dia (`incrementAgentsReadyNextDay`).
- O Governo avança o dia (`incrementDay`) e o ciclo recomeça na Fase 1. O processo se repete até o final da simulação (ano 2025).

4.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo detalhou a arquitetura e os componentes fundamentais do modelo de simulação proposto. Foram definidos os papéis dos cinco tipos de agentes que compõem o ecossistema (Governo, Produtor, *Trader* Padrão, Consumidor e Porto), bem como suas lógicas de decisão individuais.

Além disso, foram estabelecidos os protocolos de interação que governam o mercado, demonstrando como o Leilão Vickrey, mediado por artefatos `CArtAg0`, e o ciclo de vida sincronizado por fases, orquestrado pelo Governo, funcionam de forma integrada.

Com este modelo base, o "mundo" da simulação, devidamente estabelecido, o próximo capítulo se dedica a utilizá-lo. O Capítulo 5 apresentará a metodologia experimental, configurará dois cenários distintos (um *baseline* e um com intervenção) e analisará comparativamente os resultados obtidos, a fim de responder às questões de pesquisa deste trabalho.

5 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Com o modelo de simulação base estabelecido no Capítulo 4, este capítulo se dedica à sua aplicação prática. O objetivo central é utilizar a ferramenta desenvolvida para responder à questão de pesquisa: qual é o impacto da introdução de um mecanismo de estoque regulador estatal na dinâmica do mercado de milho?

Para isolar e analisar o efeito desta intervenção, dois cenários experimentais foram desenhados. O primeiro, Cenário 1 (Modelo Econômico Base), avalia o mercado em seu estado fundamental, operando apenas com os comerciantes privados, estabelecendo assim uma *baseline* para comparação. O segundo, Cenário 2 (Inclusão do Agente Comerciante Governamental), introduz o agente `governo_trader` na simulação para competir com os agentes privados.

O ponto culminante deste capítulo é a *Análise Comparativa dos Resultados* (Seção 5.4), onde os resultados de ambos os cenários são colocados lado a lado. Esta análise foca em métricas-chave como o preço médio do milho, o volume total negociado em cada mercado (doméstico e internacional), a lucratividade dos *traders* privados e o balanço financeiro do governo, permitindo uma avaliação quantitativa da eficácia da intervenção.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: a Seção 5.2 descreve a metodologia experimental comum a ambos os cenários. A Seção 5.3 detalha as configurações específicas que diferenciam o Cenário 1 do Cenário 2. A Seção 5.4 apresenta e analisa os resultados comparativos. Finalmente, a Seção 5.5 apresenta as considerações finais sobre os experimentos.

5.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para garantir a validade e a reprodutibilidade dos resultados, esta seção detalha os dados de entrada utilizados, os parâmetros fixos que definem o ambiente da simulação e as métricas de saída que foram coletadas para análise.

5.2.1 Dados de Entrada e Fontes

A simulação utiliza duas fontes de dados principais para alimentar o modelo: uma série histórica da produção de milho no Brasil e um modelo de preços internacionais.

- **Dados de Produção:** Os dados de produção de milho (em mil toneladas) para os 27 estados brasileiros foram extraídos do arquivo `csv/producaoUFA11.csv`. Esta série histórica compreende o período de 1988/89 a 2024/25. Conforme descrito no Capítulo 4, cada Agente Produtor lê o valor anual correspondente ao seu estado e o divide uniformemente ao longo dos dias do ano simulado ($\text{Produção Diária} = \text{Produção Anual} / 365$).

- **Preços Internacionais:** Os preços internacionais do milho, que servem de referência para os Agentes Porto e influenciam a estratégia dos *Traders*, são carregados do arquivo `csv/international_prices.csv`. Esta série temporal diária, com início em 1º de janeiro de 1988, não reflete dados históricos reais, mas sim os resultados de um modelo estocástico com reversão à média. O modelo foi configurado com um preço base de R\$ 90,00, um piso de R\$ 50,00 e uma volatilidade que permite flutuações, garantindo um mercado internacional dinâmico para os agentes. A opção por um modelo estocástico em detrimento da repetição da série histórica real justifica-se pela necessidade de validar a robustez do agente regulador. Ao expor o modelo a flutuações geradas matematicamente (mas estatisticamente plausíveis), garante-se que a estratégia de intervenção seja testada contra cenários inéditos e não apenas ajustada (*overfitted*) a eventos passados conhecidos.

5.2.1.1 Nota Metodológica sobre Unidades

É importante notar uma abstração metodológica feita neste trabalho: enquanto os dados de produção estão em milhares de toneladas, os preços de referência (ex: R\$ 50,00 ou R\$ 90,00) são numericamente mais alinhados ao valor de uma saca de 60kg.

Dado que o objetivo do TCC é analisar as *dinâmicas comportamentais* e o *impacto relativo* de uma intervenção política, e não prever valores financeiros absolutos, a simulação opera com unidades abstratas. Deste modo, os termos "Unidade de Volume" (UV) e "Unidade Monetária" (UM) são tratados em uma proporção de 1:1. Ou seja, um preço de 50 UM se aplica a uma oferta de 79.000 UV, permitindo que a lógica dos leilões e as estratégias de lucro funcionem de maneira consistente dentro do modelo.

5.2.2 Parâmetros Gerais da Simulação

A simulação foi executada cobrindo um período total de 37 anos, iniciando em 1988 e finalizando em 2025, totalizando aproximadamente 13.514 ciclos (dias).

Em ambos os cenários experimentais, a população de agentes base é a mesma:

- 1 Agente Governo (coordenador);
- 27 Agentes Produtores (um por estado);
- 3 Agentes Consumidores (indústria);
- 4 Agentes Portos (Santos, Paranaguá, Rio Grande e Itaqui).

Os parâmetros econômicos fixos que definem as regras do ambiente para todos os agentes são:

- **Preço Mínimo (Fase 1):** R\$ 50,00 (preço base dos Produtores).

- **Preço Base (Fase 2):** R\$ 60,00 (preço inicial sugerido pelos *Traders*).
- **Tributação (Venda Fase 2):**
 - Taxa de 12% sobre vendas domésticas (*Traders* → Consumidores), definida na crença `p_domestic_tax_rate` do agente e baseada na alíquota padrão de ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) praticada na movimentação interestadual.
 - Taxa de 0% sobre vendas de exportação (*Traders* → Portos), definida na crença `p_export_tax_rate` e simula a isenção fiscal prevista pela Lei Kandir (Lei Complementar nº 87/1996), que desonera exportações de produtos primários para aumentar a competitividade internacional.
- **Parâmetros dos Compradores (Fase 2):**
 - Consumidores: Teto de compra de R\$ 90,00, com agressividade de $95\% \pm 4\%$.
 - Portos: Margem de lucro de $5\% \pm 3\%$ sobre o preço internacional.

A distinção entre os dois cenários reside unicamente na composição da população de *Traders*, como será detalhado nas seções seguintes.

5.2.3 Métricas Coletadas

Ao final de cada dia simulado (Fase 3), cada agente registra suas métricas em arquivos .csv individuais. Os dados coletados para a análise comparativa incluem:

- Produtor: Estoque, produção diária, quantidade vendida e receita.
- *Trader*: Milho comprado (por estado), gasto (por estado), milho vendido (por estado), receita (por estado) e estoque (por estado).
- Consumidor: Milho comprado e dinheiro gasto.
- Porto: Milho comprado e dinheiro gasto.
- Governo: Receita de impostos diária.

5.3 CONFIGURAÇÃO DOS CENÁRIOS EXPERIMENTAIS

Os dois cenários executados diferem apenas na presença de um agente, permitindo isolar o impacto da intervenção governamental.

5.3.1 Cenário 1: Modelo Econômico Base

O objetivo do Cenário 1 é estabelecer uma *baseline* de comportamento do mercado. Ele utiliza o modelo base descrito no Capítulo 4, operando sem qualquer intervenção governamental direta na forma de um agente comerciante.

A configuração de agentes para este cenário, além da população base definida na Seção 5.2, é composta por 3 Agentes Comerciantes Padrão, totalizando 38 agentes na simulação.

Conforme antecipado na Seção 4.3.3, embora todos os três *traders* utilizem a mesma lógica de `trader_1.asl`, eles são inicializados com crenças distintas para criar uma população heterogênea de intermediários, simulando diferentes perfis de mercado:

- **Trader 1 (Benchmark):** Representa um agente de mercado padrão, com custo operacional de `my_cost(5.0)` e taxa de aprendizado de `my_learning_rate(0.5)`.
- **Trader 2 (Conservative Powerhouse):** Simula um agente estabelecido e avesso ao risco. Possui um custo operacional baixo (`my_cost(2.0)`) e uma taxa de aprendizado lenta (`my_learning_rate(0.1)`), o que o torna menos reativo a flutuações de curto prazo.
- **Trader 3 (Aggressive Newcomer):** Simula um novo entrante agressivo, disposto a correr riscos. Possui um custo operacional mais alto (`my_cost(7.0)`), mas uma taxa de aprendizado muito rápida (`my_learning_rate(0.9)`), adaptando-se imediatamente às oportunidades de mercado.

5.3.1.1 Lógica de Aprendizado Adaptativo (Learning Rate)

O mecanismo de *learning rate* implementado nos agentes *traders* utiliza uma média ponderada exponencial para atualizar a crença sobre o valor de revenda do milho (E). A cada ciclo de leilão, o agente combina sua memória histórica com a melhor oportunidade de mercado disponível no momento (*Target Revenue*).

A atualização da crença segue a fórmula matemática:

$$E_{new} = (E_{old} \times (1 - W_{new})) + (Target_Revenue \times W_{new})$$

Onde W_{new} representa a taxa de aprendizado. Esta implementação permite que diferentes perfis de agentes reajam à volatilidade:

- W_{new} **alto (ex: 0.9):** O agente prioriza a informação mais recente, adaptando-se rapidamente a choques de preço, mas com menor estabilidade.
- W_{new} **baixo (ex: 0.1):** O agente prioriza sua memória, resultando em uma adaptação lenta e maior resistência a flutuações temporárias do mercado internacional.

Todos os *traders* privados neste cenário operam com a mesma tributação (12% doméstica, 0% exportação), crença inicial de revenda de R\$ 80,00.

5.3.2 Cenário 2: Inclusão do Agente Comerciante Governamental

O objetivo do Cenário 2 é medir o impacto da intervenção de um agente estatal atuando como regulador.

A configuração de agentes é idêntica ao Cenário 1, com a adição de um quarto agente comerciante: o `governo_trader` (implementado pelo `governo_trader.asl`), elevando o total para 39 agentes.

Este agente se diferencia dos *traders* privados em aspectos cruciais de sua estratégia, como definido no Capítulo 4:

- Estratégia de Compra (Fase 1): Seu cálculo de lance foca apenas no mercado doméstico (ignora `P_intl`) e ele é isento de impostos (`p_domestic_tax_rate(0.0)`).
- Estratégia de Venda (Fase 2): Diferente dos agentes privados, ele não visa a maximização de lucro, atuando estritamente como um Estoque Regulador. Ele só vende para compradores domésticos (Consumidores) e apenas sob condições específicas de escassez ou alta de preços (ex: "*Surplus Dump*" ou "*Panic Sell*"), retendo o milho em estoque no restante do tempo para garantir a segurança do abastecimento.

Este cenário, portanto, testa a hipótese de que a presença de um agente focado no abastecimento interno, e com vantagens fiscais, pode alterar significativamente os resultados do mercado em favor do consumo doméstico.

5.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta a análise comparativa dos resultados obtidos nos dois cenários. A análise é dividida por métricas-chave para avaliar o impacto da intervenção do `governo_trader`.

5.4.1 Impacto no Preço do Milho

O primeiro e mais direto impacto da intervenção do `governo_trader` pode ser observado na formação de preços ao longo dos 37 anos da simulação, tanto no preço pago ao produtor (Fase 1) quanto no preço pago pelos compradores finais (Fase 2).

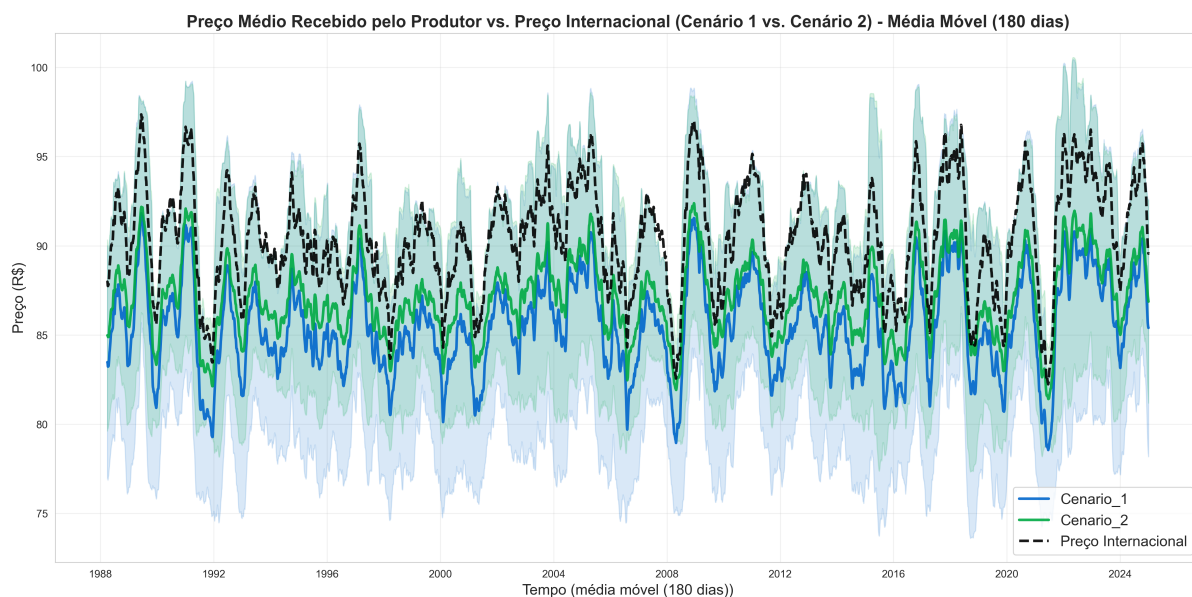


Figura 4 – Evolução do preço médio pago ao produtor (C1 vs. C2) em relação ao Preço Internacional.

A Figura 4 demonstra o efeito da competição aumentada na Fase 1. Ao contrário do que se poderia supor, a intervenção beneficia o produtor:

- No Cenário 1 (linha azul), com apenas três *traders* privados competindo, o preço médio pago ao produtor flutua em maior consonância com o Preço Internacional (linha preta), mas frequentemente abaixo dele.
- No Cenário 2 (linha verde), a presença do governo_trader — que compete ativamente e é isento de impostos, podendo assim oferecer lances maiores — eleva a competição. Isso força os *traders* privados a aumentarem seus lances para garantir o produto. Como resultado, o preço médio pago ao produtor no C2 é consistentemente *superior* ao do C1. A intervenção impede que as baixas de preço sejam tão acentuadas e garante que o produtor receba valores mais altos, mesmo em momentos de alta internacional.

Este efeito de regulação se propaga de forma distinta para os compradores finais na Fase 2, como detalhado na Figura 5.

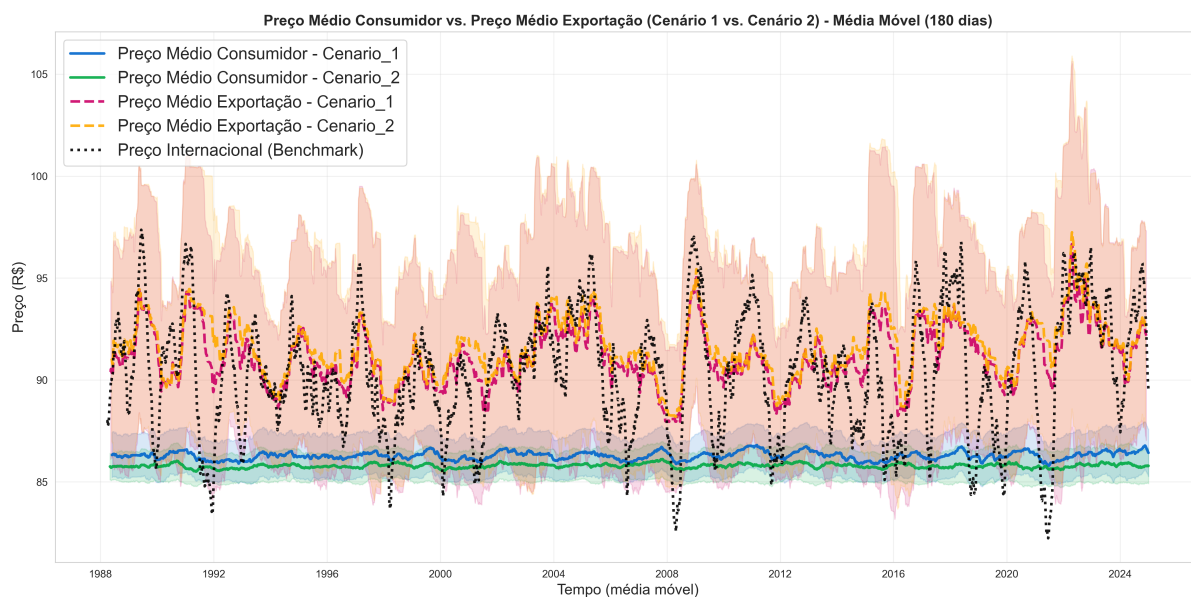


Figura 5 – Comparativo temporal do preço médio pago pelos Consumidores (Doméstico) e Portos (Exportação) em ambos cenários.

A análise dos preços pagos pelos compradores finais (Figura 5) revela uma inversão de mercado, confirmando a eficácia da intervenção:

- *Mercado Doméstico (Consumidores)*: No Cenário 1 (linha azul), o preço pago pelo consumidor é mais alto. No Cenário 2 (linha verde), o preço pago pelo consumidor é consistentemente *inferior*. Isso ocorre porque o governo_trader, que não visa lucro e só vende internamente, aumenta a oferta de milho no mercado doméstico (Fase 2), forçando os *traders* privados a baixarem seus preços para competir.
- *Mercado de Exportação (Portos)*: O oposto ocorre no mercado de exportação. No Cenário 1 (linha rosa), os portos pagam um preço mais baixo. No Cenário 2 (linha laranja), o preço de exportação é visivelmente *superior*. Com o governo_trader absorvendo parte da oferta (Fase 1) e não a revendendo para exportação (Fase 2), a oferta de milho para os portos diminui. Isso reduz a concorrência entre os *traders* privados, que conseguem cobrar preços mais altos do mercado internacional.

Em suma, a intervenção do governo_trader foi bem-sucedida em beneficiar a cadeia doméstica em ambas as pontas: o produtor recebeu mais pelo seu produto, enquanto a indústria nacional (consumidor) pagou mais barato. O custo dessa regulação foi "pago" pelo mercado de exportação (Portos), que enfrentou uma oferta menor e preços mais altos.

5.4.2 Impacto no Volume e Abastecimento do Mercado

A análise de preços da seção anterior é diretamente corroborada pelo impacto observado no volume de milho negociado em cada mercado. A Figura 6 (que agrega os volumes totais de toda a simulação) demonstra visualmente a principal consequência da intervenção.

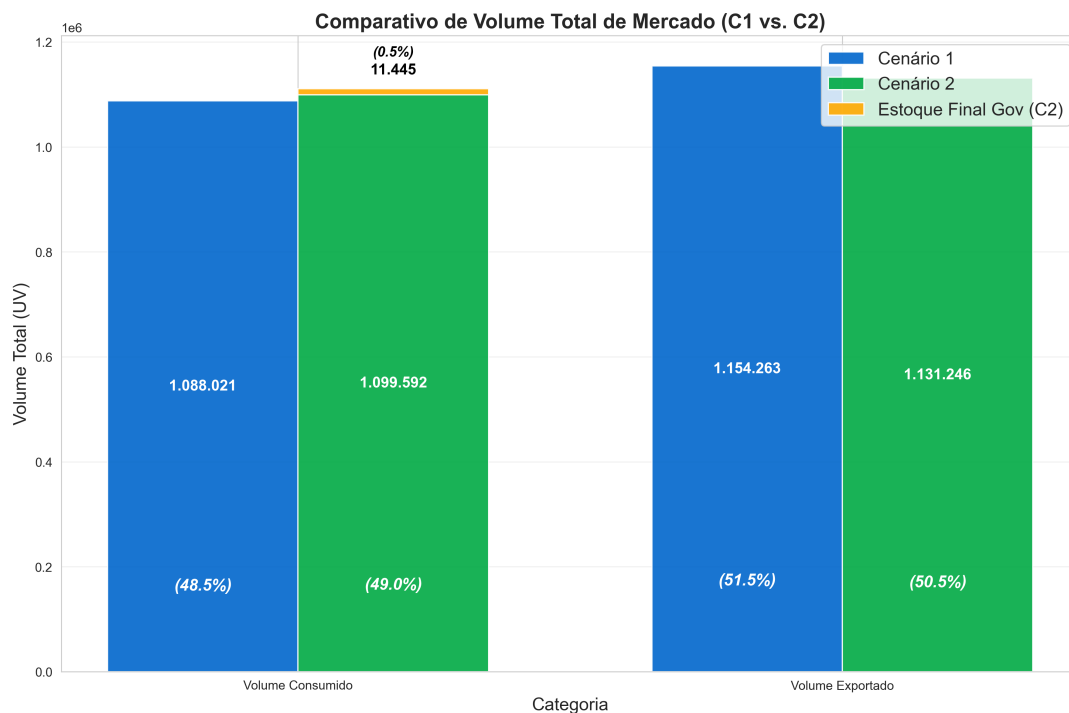


Figura 6 – Volume total negociado no Mercado Doméstico vs. Exportação (C1 vs. C2). A barra do C2 inclui o estoque final do governo como parte do "Volume Doméstico".

Como o gráfico de barras evidencia, a adição do governo_trader (Cenário 2) provocou uma inversão na destinação do produto: o volume total consumido internamente aumentou de forma significativa, enquanto o volume total exportado diminuiu. A barra do Cenário 2 também inclui o estoque final mantido pelo governo_trader que, por não ter sido exportado, pode ser considerado parte do volume retido para o abastecimento doméstico.

A Figura 7 explica o *mecanismo* que causa essa mudança. Ela plota a variação do estoque do governo_trader (linha azul) contra o preço internacional (linha laranja).

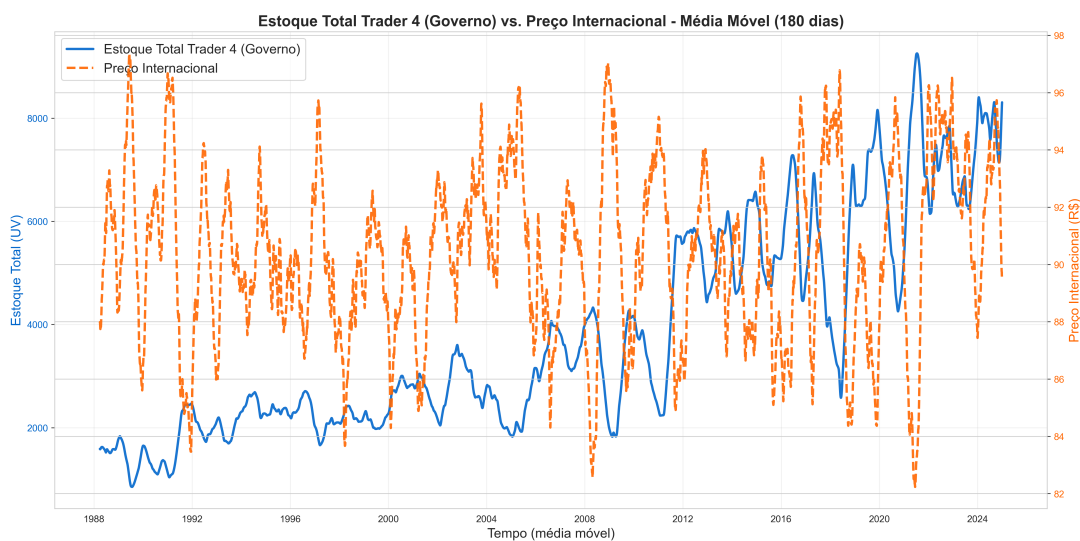


Figura 7 – Variação temporal do estoque do governo_trader (C2) em relação ao Preço Internacional.

O gráfico demonstra claramente a lógica do agente regulador: ele adquire e acumula estoque ao longo do tempo (comprando na Fase 1) e o vende (libera para o mercado interno) precisamente nos momentos de maior alta do preço internacional. Esta ação corresponde à estratégia de "Panic Sell" (venda de pânico) definida na Seção 5.3.2, que injeta oferta no mercado doméstico e impede que os preços internos subam junto com os internacionais, garantindo o abastecimento e a redução de preços para o consumidor, como visto na Seção 5.4.1.

5.4.3 Impacto na Performance dos *Traders* Privados

A intervenção do governo_trader não afeta apenas os preços, mas tem um impacto direto e significativo na lucratividade dos agentes privados, que agora enfrentam um concorrente isento de impostos. A Figura 8 ilustra a evolução do lucro líquido e do Retorno sobre Investimento (ROI) para os *traders* privados em ambos os cenários.



Figura 8 – Evolução do Lucro Líquido e Retorno sobre Investimento (ROI) dos *traders* privados (C1 vs. C2).

Como esperado, a competição adicional na Fase 1 (aumentando o preço de compra) e a maior oferta na Fase 2 doméstica (diminuindo o preço de venda interna) comprimem as margens de lucro dos *traders* privados. A análise da Figura 8 (e dos gráficos de barras de lucro total, se disponíveis) revela que:

- *Lucro Líquido*: O lucro líquido total acumulado dos três *traders* privados é visivelmente menor no Cenário 2 em comparação com o Cenário 1. Os agentes perdem rentabilidade devido à concorrência do agente estatal, que absorve parte de suas oportunidades de mercado, especialmente as de exportação, que são mais lucrativas (0% de imposto).
- *Retorno sobre Investimento (ROI)*: Uma observação mais sutil, no entanto, surge na análise do ROI. Enquanto os *traders Benchmark* (T1) e *Conservative* (T2) veem seu ROI diminuir ou estagnar no Cenário 2, o *trader Aggressive Newcomer* (T3) demonstra um ROI percentual superior. Isso sugere que sua alta taxa de aprendizado (`my_learning_rate(0.9)`) permitiu que ele se adaptasse mais rapidamente à nova dinâmica do mercado, tornando-se mais *eficiente* em identificar as poucas oportunidades de lucro que restaram, mesmo que seu volume total de negócios e lucro líquido tenham diminuído.

Esta análise demonstra que, embora a intervenção tenha reduzido a lucratividade geral do setor privado, os agentes com maior capacidade de adaptação (aprendizado rápido) foram os que melhor navegaram o novo ambiente competitivo. A nota sobre o balanço do `governo_trader`, que inclui o valor do seu estoque final, será abordada na seção seguinte.

5.4.4 Análise do Balanço Governamental

A última métrica de análise é o impacto financeiro para o governo. No Cenário 1, o "ganho" do governo é composto apenas pela arrecadação de impostos dos *traders* privados. No Cenário 2, o balanço é mais complexo, sendo a soma da (nova) arrecadação de impostos, o balanço operacional do `governo_trader` (lucro ou prejuízo) e o valor do estoque final mantido por ele.

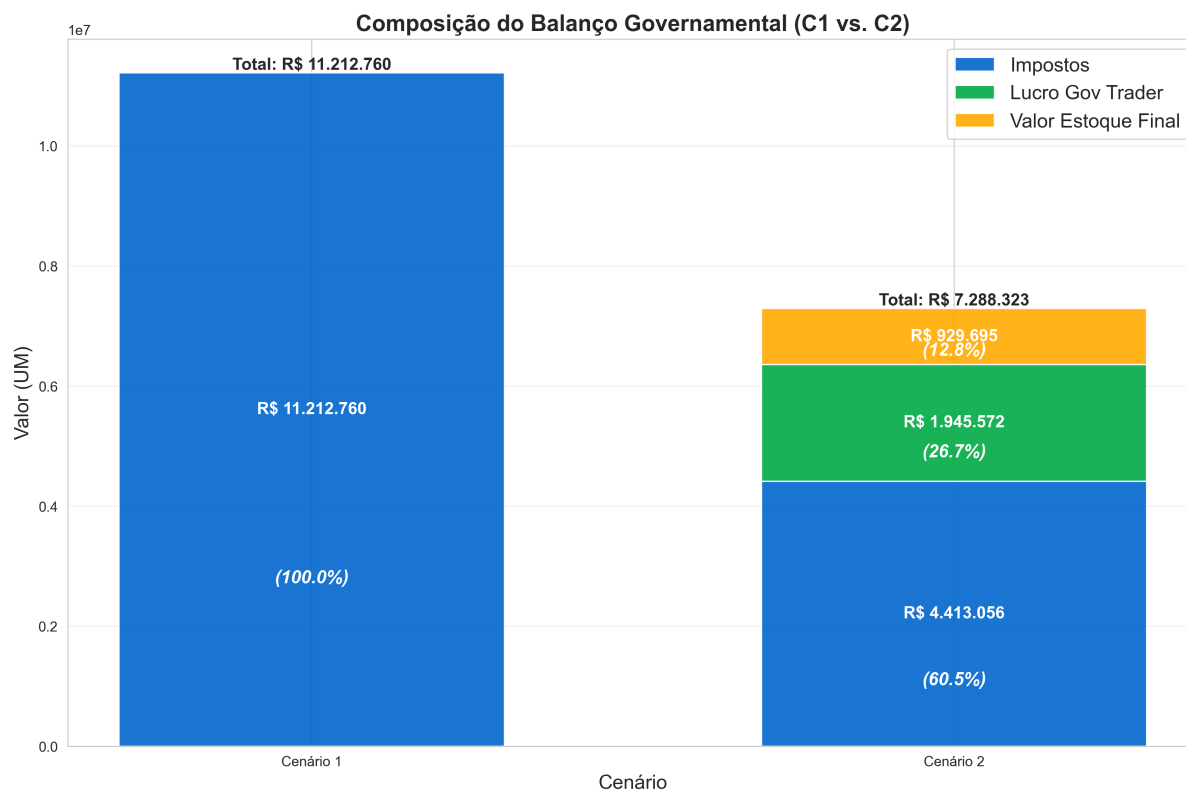


Figura 9 – Composição do Balanço Total do Governo no Cenário 2 (Impostos + Balanço *Trader* 4 + Estoque Final).

A Figura 9 demonstra um *trade-off* financeiro claro. O balanço total do governo no Cenário 2 (barra "Total C2") é significativamente *menor* do que a arrecadação pura de impostos do Cenário 1 (barra "Total C1").

A composição do balanço do Cenário 2, detalhada no gráfico de barras empilhadas, explica esta queda. O ganho total é composto por três partes: a arrecadação de impostos (barra azul), o balanço operacional do governo_trader (barra verde, que representa seu lucro ou prejuízo) e o valor estimado do seu estoque final (barra laranja).

A explicação para a queda no balanço total, mesmo com o governo_trader terminando com um estoque valioso (barra laranja), reside na "canibalização" da receita de impostos (barra azul). No Cenário 1, 100% do (menor) volume doméstico era vendido por *traders* privados, gerando 12% de imposto. No Cenário 2, a maior parte do (maior) volume doméstico é vendida pelo governo_trader, que é isento de impostos.

Embora o governo_trader possa ter um balanço operacional (barra verde) e um estoque final (barra laranja) que somam um valor positivo, esses ganhos não compensam a substancial perda de arrecadação (barra azul) causada por sua própria participação no mercado. Portanto, a política de intervenção de estoque regulador, embora bem-sucedida em regular preços e garantir o abastecimento interno, representa um custo financeiro líquido para o balanço governamental.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A análise comparativa dos dois cenários experimentais permitiu responder à questão de pesquisa central deste trabalho. Os resultados demonstram de forma clara que a introdução de um agente comerciante governamental (*governo_trader*) com uma estratégia de estoque regulador e isenção fiscal tem impactos profundos e complexos em toda a cadeia de suprimentos.

Primeiramente, a intervenção foi bem-sucedida em seus objetivos primários: beneficiar os atores domésticos. Os Produtores passaram a receber um preço médio mais alto pelo milho, resultado da maior competição na Fase 1. Simultaneamente, os Consumidores industriais pagaram um preço médio mais baixo, resultado da maior oferta de milho no mercado interno (Fase 2) provida pelo agente estatal.

Em segundo lugar, essa regulação doméstica foi "financiada" por dois setores. O mercado de Portos (exportação) pagou preços significativamente mais altos, pois o *governo_trader* retirou volume de milho que anteriormente seria destinado à exportação. Além disso, os Traders Privados tiveram sua lucratividade líquida reduzida, pois suas margens foram comprimidas (comprando mais caro e vendendo mais barato no mercado interno).

Finalmente, a simulação revelou um *trade-off* financeiro para o próprio governo. Embora a política tenha sido eficaz, o balanço governamental total (impostos + balanço do agente + estoque) foi menor no Cenário 2. Isso ocorreu porque o *governo_trader* isento de impostos "canibalizou" a arrecadação que os *traders* privados geravam no Cenário 1. O modelo, portanto, quantifica o custo fiscal da intervenção.

Vale destacar que esses resultados positivos para produtores e consumidores foram obtidos mesmo sob uma parametrização conservadora do agente de estoque regulador. O *governo_trader* foi modelado com uma lógica próxima à de mercado, buscando momentos estratégicos para atuar, e não como uma entidade de subsídio irrestrito a fundo perdido. O fato de benefícios sociais tangíveis terem emergido já neste ponto de partida reforça a validade da hipótese. A exploração de parâmetros mais agressivos ou de diferentes tolerâncias ao risco fiscal, conforme sugerido pela banca, apresenta-se como um caminho natural para trabalhos futuros, visando calibrar a intensidade ideal dessa intervenção.

Com este modelo validado e os resultados analisados, o próximo capítulo apresentará a conclusão geral deste trabalho e discutirá em detalhes os caminhos para essas pesquisas futuras.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso propôs-se a investigar o impacto de uma intervenção governamental estratégica no complexo mercado brasileiro de milho, um setor marcado pela tensão entre a lucrativa exportação e a necessidade de abastecimento doméstico. A questão central era quantificar os *trade-offs* de uma política de regulação de preços e abastecimento.

Para responder a esta questão, foi projetado, implementado e validado um modelo de simulação baseado em agentes (SMA) utilizando a plataforma JaCaMo (Capítulo 4). O modelo representou os principais atores da cadeia (Produtores, *Traders* Privados, Consumidores e Portos) e suas lógicas de decisão e interação através de leilões Vickrey mediados por artefatos CArtAg0.

A metodologia experimental (Capítulo 5) consistiu na comparação direta de dois cenários: um Cenário 1 (C1), servindo como *baseline* de um mercado puramente privado; e um Cenário 2 (C2), que introduziu um *governo_trader*. Este agente estatal competiu na compra de milho (Fase 1) com isenção fiscal e atuou como um estoque regulador, vendendo apenas para o mercado interno (Fase 2).

Os resultados da simulação demonstraram que a intervenção foi altamente eficaz em seus objetivos primários. A análise comparativa revelou que, no Cenário 2:

1. O *preço pago ao produtor* foi consistentemente *superior* ao do C1, devido à maior competição na compra (Fase 1).
2. O *preço pago pelo consumidor* doméstico foi consistentemente *inferior* ao do C1, devido à maior oferta interna (Fase 2).
3. O *volume de milho destinado ao mercado interno* (abastecimento) aumentou, revertendo a tendência de exportação observada no C1.

No entanto, o modelo também quantificou os custos dessa intervenção. Essa regulação foi "financiada" por dois setores: os Portos (exportação), que pagaram preços mais altos pelo milho restante, e os *Traders* Privados, que viram sua lucratividade líquida total ser significativamente reduzida. Além disso, o balanço financeiro total do governo (considerando arrecadação de impostos, o balanço operacional do *governo_trader* e seu estoque final) foi menor no Cenário 2, indicando um custo fiscal líquido para a implementação da política.

Portanto, este trabalho conclui que o modelo de intervenção proposto é uma ferramenta eficaz para garantir o abastecimento interno e beneficiar tanto produtores quanto consumidores nacionais, mas que seu custo é absorvido pelos agentes de exportação, pelos intermediários privados e pelo próprio balanço fiscal do governo.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

O modelo desenvolvido neste trabalho é uma base robusta para futuras investigações sobre políticas públicas e dinâmicas de mercado. As seguintes extensões são propostas como trabalhos futuros:

- **Agente Governamental Reativo:** Tornar o agente Governo (o coordenador) mais proativo. Em vez de impostos fixos, ele poderia ajustar dinamicamente os impostos (ex: `p_domestic_tax_rate`) com base em métricas da simulação, como o nível de estoque do `governo_trader` ou a variação do preço internacional, testando políticas tributárias adaptativas.
- **Sofisticação do `governo_trader`:** Explorar lógicas de decisão mais complexas para o agente interventor. Por exemplo, sua lógica de "Panic Sell" (venda) poderia ser ativada pela alta do preço *doméstico* em vez do internacional. Além disso, sua estratégia de compra (Fase 1) poderia incluir um "preço teto" para evitar inflacionar demais o mercado para o produtor.
- **Dados de Produção Sazonais:** Substituir a produção diária (baseada na média anual) por uma distribuição sazonal que reflita os períodos de safra e entressafra do milho no Brasil. Isso testaria de forma mais realista a capacidade do estoque regulador do governo em gerenciar a escassez em certos períodos do ano.
- **Heterogeneidade dos Compradores:** Introduzir diferentes perfis de Consumidor `Industria` e `Porto`, com diferentes tetos de preço e estratégias de margem, para criar uma competição mais realista na Fase 2.
- **Inclusão de Logística:** Expandir o modelo para incluir custos de transporte (frete) entre os estados produtores e os portos/consumidores, o que adicionaria uma nova dimensão estratégica nas decisões de compra e venda dos *traders*.

REFERÊNCIAS

- BERISHA, B.; MëZIU, E.; SHABANI, I. Big data analytics in cloud computing: an overview. **Journal Of Cloud Computing**, v. 11, n. 1, p. 24–24, aug 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00301-w>.
- BOISSIER, O. Multi-agent oriented programming and intelligent environments. In: **2013 19th International Conference on Control Systems and Computer Science**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 457–464.
- BORDINI, R. H.; HübNER, J. F.; WOOLDRIDGE, M. **Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak using Jason**. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A modern approach**. 4. ed. Hoboken: Pearson, 2020.
- SEN, A. **Poverty and Famines: An Essay on Entitlement and Deprivation**. Oxford: Oxford University Press, 1981.
- TESFATSION, L.; JUDD, K. L. **Handbook of Computational Economics, Volume 2: Agent-Based Computational Economics (Handbook of Computational Economics)**. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland Publishing Co., 2006. ISBN 0444512535.
- WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to MultiAgent System**. second. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- ZHENG, S. et al. The ai economist: taxation policy design via two-level deep multiagent reinforcement learning. **Science Advances**, v. 8, n. 18, may 2022. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abk2607>.

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE E ORIENTAÇÕES DE USO

Em conformidade com as diretrizes de submissão da UFSC, o código fonte desenvolvido neste trabalho encontra-se disponível publicamente no repositório institucional de códigos da universidade.

ACESSO AO REPOSITÓRIO

O artefato de software produzido, incluindo scripts, configurações e documentação técnica, pode ser acessado através do seguinte endereço eletrônico:

https://codigos.ufsc.br/gabriela.r.lother/mas_tcc

ORIENTAÇÕES DE UTILIZAÇÃO

O projeto implementa uma simulação baseada em agentes utilizando o framework *JaCaMo*. Para a correta execução e reprodução dos resultados, devem ser observadas as instruções abaixo, conforme detalhado na documentação do projeto:

1. **Requisitos de Sistema:** O software requer a instalação prévia do **Java JDK 21** (ou superior). O gerenciamento de dependências e a compilação são realizados automaticamente via *Gradle*, incluído no próprio projeto.
2. **Instalação:** Realize o *clone* do repositório ou o *download* dos arquivos para um diretório local.
3. **Execução:** A execução é realizada através do terminal na raiz do projeto.
 - Em ambientes **Windows**, utilize o comando:

```
.\gradlew.bat
```
 - Em ambientes **Linux** ou **macOS**, utilize o comando:

```
./gradlew
```

Este comando iniciará a plataforma JaCaMo e executará a simulação conforme definido no arquivo de configuração `oops.jcm`.

Informações adicionais sobre a estrutura interna dos agentes (diretório `src/agt/`) e do ambiente (diretório `src/env/`) encontram-se no arquivo `README.md` na raiz do repositório.

APÊNDICE B – ARTIGO CIENTÍFICO

A seguir apresenta-se o artigo científico produzido a partir dos resultados deste trabalho, formatado de acordo com o modelo da Sociedade Brasileira de Computação (SBC).

Desenvolvimento de um Modelo Econômico em Sistemas
Multiagentes: uma análise da intervenção estatal no mercado
de milho

*Development of an Economic Model in Multi-Agent
Systems: an analysis of state intervention in the corn
market*

Gabriela Regina Lother*

Elder Rizzon Santos†

2025

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo de simulação econômica baseado em agentes para analisar o impacto da intervenção estatal na formação de preços e na disponibilidade de oferta no mercado interno de *commodities*, focado no contexto brasileiro de exportação de milho. Utilizando a plataforma JaCaMo, foi implementado um sistema multiagente composto por agentes Produtores, *Traders*, Consumidores, Portos e um agente Governamental. O modelo simula a dinâmica do mercado através de um mecanismo de leilão em duas fases. O foco da análise é comparar dois cenários: um cenário padrão (*baseline*), sem estoques reguladores, e um cenário de intervenção, onde o governo opera um estoque regulador. Os resultados permitem avaliar as consequências de cada cenário, oferecendo *insights* sobre o equilíbrio entre o lucro dos intermediários e a segurança do abastecimento nacional.

Palavras-chave: Inteligência Artificial. Sistemas Multiagentes. Economia Computacional. Simulação Baseada em Agentes. Intervenção Estatal.

Abstract

*Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

†Orientador. Professor Dr. do Departamento de Informática e Estatística da UFSC.

This work presents the development of an agent-based economic simulation model to analyze the impact of state intervention on price formation and supply availability in the domestic commodities market, focusing on the Brazilian corn export context. Using the JaCaMo platform, a multi-agent system was implemented, comprising Producer, Trader, Consumer, Port, and Government agents. The model simulates market dynamics through a two-phase auction mechanism. The focus of the analysis is to compare two scenarios: a standard (baseline) scenario, without regulatory stocks, and an intervention scenario, where the government operates a regulatory stock mechanism. The results allow for assessing the consequences of each scenario, offering insights into the trade-off between intermediary profits and national supply security.

Keywords: Artificial Intelligence. Multi-Agent Systems. Computational Economics. Agent-Based Simulation. State Intervention.

1 Introdução

O progresso da capacidade de processamento computacional e a crescente disponibilidade de dados têm impulsionado novas áreas de aplicação tecnológica. Nesse contexto, a Inteligência Artificial (IA) destaca-se pelo design e construção de agentes inteligentes que percebem e atuam em seus ambientes (RUSSELL; NORVIG, 2020). Uma das principais vertentes desta área são os Sistemas Multiagentes (SMA), onde agentes autônomos interagem para alcançar objetivos individuais ou coletivos, exibindo graus variados de autonomia, reatividade, proatividade e sociabilidade (BORDINI; HübNER; WOOLDRIDGE, 2007).

Uma área de aplicação promissora para SMAs é a Economia Computacional Baseada em Agentes (ACE - *Agent-based Computational Economics*). Diferente de abordagens clássicas que dependem de agentes representativos e equilíbrio de mercado, a ACE permite simular cenários onde fenômenos macroeconômicos emergem de interações locais entre agentes heterogêneos (TESFATSION; JUDD, 2006). Essa abordagem é ideal para testar políticas públicas em ambientes controlados, superando limitações de dados históricos e experimentos reais.

O presente trabalho aplica esses conceitos ao contexto do mercado brasileiro de milho, caracterizado por uma tensão entre a forte demanda de exportação e a necessidade de abastecimento interno. O objetivo central é desenvolver um modelo de simulação na plataforma JaCaMo que represente produtores, intermediários (*traders*), consumidores e uma entidade governamental.

Busca-se, especificamente, analisar os impactos e *trade-offs* da introdução de um mecanismo de estoque regulador estatal. O trabalho contrasta um cenário de livre mercado (*baseline*) com um cenário de intervenção, testando a hipótese de que a atuação ativa do Estado na compra e venda da *commodity* pode reduzir a volatilidade de preços e garantir a oferta interna, ainda que isso gere custos fiscais ou impacte o volume exportado.

2 Metodologia e Modelo Proposto

Para investigar as dinâmicas do mercado de milho, foi desenvolvido um modelo de simulação baseado em agentes utilizando a plataforma JaCaMo, que integra as dimensões de Agentes (*Jason*), Ambiente (*CARTAG0*) e Organização (*Moise*). O modelo foca na representatividade dos fenômenos econômicos, priorizando a interação Agente-Ambiente através de artefatos que gerenciam a sincronização do tempo e os protocolos de mercado. O código

fonte completo, incluindo scripts e configurações, encontra-se disponível publicamente no repositório institucional da UFSC¹.

2.1 Arquitetura e Agentes

O sistema é composto por agentes heterogêneos que representam os principais atores da cadeia de suprimentos:

- **Agente Governo (Orquestrador):** Diferente do agente interventor econômico, este agente atua como infraestrutura. Ele gerencia o ciclo de vida da simulação, sincronizando as fases do dia e a coleta de impostos, mas não participa das negociações de compra e venda.
- **Agentes Produtores:** Representam a oferta. Cada agente corresponde a um estado brasileiro, calculando sua produção diária com base em séries históricas reais (1988-2024). Seu objetivo é vender toda a produção diária na Fase 1.
- **Agentes Traders (Intermediários):** Atuam na compra e na revenda, buscando maximizar o lucro. Utilizam um mecanismo de aprendizado adaptativo (*learning rate*) para ajustar suas crenças de preço de revenda baseando-se na memória histórica e na oportunidade atual do mercado internacional ou doméstico.
- **Agentes Consumidores (Indústria):** Representam a demanda interna. Competem agressivamente nos leilões de venda (Fase 2) para garantir o suprimento industrial, limitados por um teto de preço.
- **Agentes Portos (Exportação):** Representam a demanda externa. Sua estratégia é baseada em margem de lucro sobre o preço internacional do dia, comprando apenas se a revenda for rentável.

A arquitetura também prevê, para o cenário de intervenção, um **Agente Comerciante Governamental** (*Government Trader*). Este agente difere dos privados por ser isento de impostos e ter como regra de negócio a proteção do abastecimento interno, estocando milho e vendendo-o domesticamente apenas em momentos de alta de preços (estratégia de *Panic Sell*).

2.2 Protocolos e Ciclo de Vida

A interação econômica é mediada por artefatos **CARTAGD** que implementam o protocolo de Leilão Vickrey (leilão de segundo preço). Este mecanismo foi escolhido por incentivar os agentes a ofertarem lances próximos à sua valoração real (*truth-telling*).

O tempo na simulação progride em um ciclo diário dividido em três fases síncronas:

1. **Fase 1 (Compra):** Produtores leiloam sua safra. *Traders* (privados e governamental) competem para adquirir estoque.
2. **Fase 2 (Venda):** *Traders* que possuem estoque iniciam leilões de revenda. Consumidores e Portos competem para adquirir o produto. É nesta fase que incide a tributação (12% para venda interna, 0% para exportação).

¹ Disponível em: <https://codigos.ufsc.br/gabriela.r.lother/mas_tcc>

3. **Fase 3 (Logging):** Os agentes registram suas métricas financeiras e de estoque, e o dia avança.

3 Experimentos e Análise de Resultados

Para validar o modelo e responder à questão de pesquisa, foram configurados dois cenários distintos cobrindo um período simulado de 37 anos (1988 a 2025). A simulação utilizou dados reais de produção histórica dos estados brasileiros e um modelo estocástico para os preços internacionais.

3.1 Configuração dos Cenários

- **Cenário 1 (Baseline):** Representa o livre mercado. A população de *traders* é composta exclusivamente por agentes privados com perfis heterogêneos (conservadores a agressivos), sujeitos a impostos sobre venda doméstica (12%) e isenção na exportação.
- **Cenário 2 (Intervenção):** Introduce o Agente Governamental Comerciante. Este agente compete na compra do milho (Fase 1) e opera um estoque regulador, vendendo apenas no mercado interno (Fase 2) para mitigar altas de preços.

3.2 Análise Comparativa

Os resultados demonstraram impactos significativos na formação de preços e na distribuição de volume. A Figura 1 ilustra o efeito da intervenção na ponta da produção.

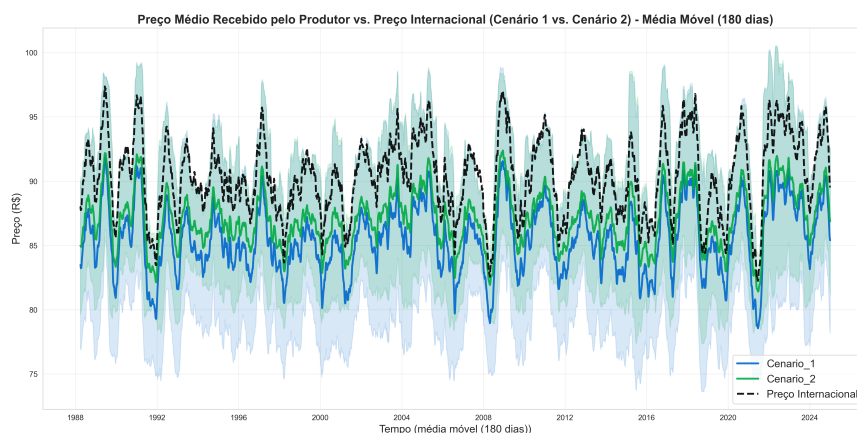


Figura 1 – Comparativo: Preço médio pago ao produtor (Cenário 1 vs. Cenário 2).

Observou-se que os Produtores receberam, em média, valores superiores no Cenário 2. A entrada do agente governamental na Fase 1 aumentou a concorrência, forçando os *traders* privados a elevarem seus lances.

Já na ponta do consumo, a Figura 2 revela uma inversão de mercado favorável ao abastecimento nacional.

Como evidenciado na Figura 2, os Consumidores (linha verde) pagaram preços consistentemente inferiores no cenário com intervenção comparado ao baseline (linha azul).

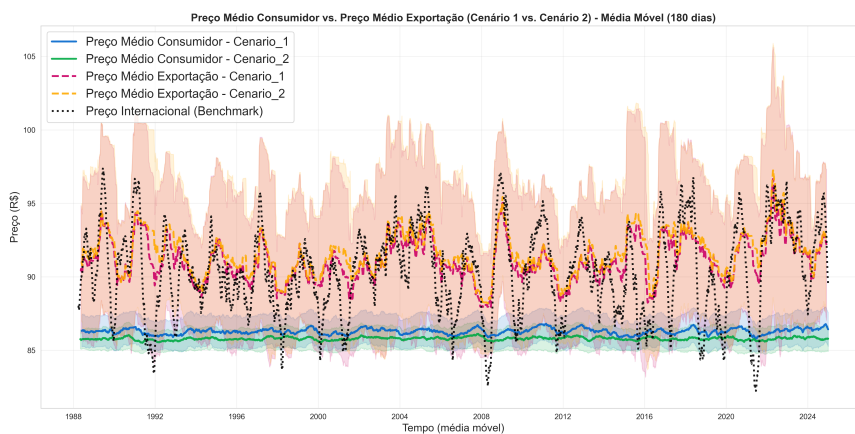


Figura 2 – Comparativo: Preço médio pago por Consumidores (Doméstico) e Portos (Exportação).

A atuação do estoque regulador na Fase 2 aumentou a oferta doméstica, pressionando os preços para baixo.

Em contrapartida, o mercado de Exportação (Portos) enfrentou preços mais altos (linha laranja vs. rosa), uma vez que a oferta disponível para o exterior foi reduzida pela retenção do estoque regulador.

4 Considerações Finais

Este trabalho apresentou um modelo de simulação baseado em agentes para analisar o mercado de milho brasileiro. A implementação na plataforma JaCaMo permitiu isolar e quantificar os efeitos de uma política de estoque regulador.

Conclui-se que a intervenção estatal, nos moldes modelados, é eficaz para garantir a segurança do abastecimento interno e reduzir preços ao consumidor, beneficiando simultaneamente o produtor através do aumento da competição. Contudo, esta segurança tem um custo econômico claro: a redução da competitividade na exportação e a necessidade de aporte fiscal, evidenciando o complexo equilíbrio entre a soberania alimentar e a eficiência de livre mercado.

Trabalhos futuros incluem a implementação de sazonalidade na produção (safra/entressafra) e a introdução de uma lógica tributária adaptativa para o agente regulador.

Referências

BORDINI, R. H.; HübNER, J. F.; WOOLDRIDGE, M. *Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak using Jason*. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd., 2007. Citado na página 2.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. *Artificial Intelligence: A modern approach*. 4. ed. Hoboken: Pearson, 2020. Citado na página 2.

TESFATSION, L.; JUDD, K. L. *Handbook of Computational Economics, Volume 2: Agent-Based Computational Economics (Handbook of Computational Economics)*. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland Publishing Co., 2006. ISBN 0444512535. Citado na página 2.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Elder Rizzon Santos, pela orientação fundamental e discussões que guiaram este trabalho. Agradeço também aos membros da banca, Prof. Dr. Maicon Rafael Zatelli e Profa. Dra. Jerusa Marchi, pelas valiosas contribuições. Estendo minha gratidão à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela infraestrutura e ensino de excelência, e à minha família e amigos, especialmente à Maria Luiza, pelo apoio incondicional.