

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS / FACULDADE DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM**  
**COMPUTACIONAL**

**Iago Gomes de Lima Rosa**

**Heurística para Instabilidade Financeira Sob Incerteza Keynesiana: Uma  
Abordagem Baseada em Agentes**

Juiz de Fora

2023



Iago Gomes de Lima Rosa

**Heurística para Instabilidade Financeira Sob Incerteza Keynesiana: Uma  
Abordagem Baseada em Agentes**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional. Área de concentração: Sistemas Computacionais Aplicados.

Orientador: Prof. D.Sc. Leonardo Goliatt da Fonseca

Coorientador: Prof. D.Sc. Teófilo Henrique Pereira de Paula

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Rosa, Iago Gomes de Lima.

Heurística para Instabilidade Financeira Sob Incerteza Keynesiana: Uma  
Abordagem Baseada em Agentes / Iago Gomes de Lima Rosa. – 2023.

89 f. : il.

Orientador: Leonardo Goliatt da Fonseca

Coorientador: Teófilo Henrique Pereira de Paula

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto  
de Ciências Exatas / Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação  
em Modelagem Computacional, 2023.

1. Instabilidade financeira. 2. Modelo baseado em agentes. 3. Inteligên-  
cia artificial e computacional. I. Fonseca, Leonardo Goliatt da, orient. II.  
Paula, Teófilo Henrique Pereira de, coorient. III. Título.

**Iago Gomes de Lima Rosa**

**Heurística para Instabilidade Financeira Sob Incerteza Keynesiana: Uma Abordagem  
Baseada em Agentes**

Dissertação  
apresentada ao  
Programa de Pós-  
Graduação em  
Modelagem  
Computacional da Universidade  
Federal de Juiz de  
Fora como requisito  
parcial à obtenção do  
título de Mestre em  
Modelagem  
Computacional. Área  
de  
concentração: Modelagem  
Computacional.

Aprovada em 20 de março de 2023.

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof(a) Dr(a). Leonardo Goliatt da Fonseca** - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

**Prof(a) Dr(a). Teófilo Henrique Pereira de Paula** - Coorientador  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

**Prof(a) Dr(a). Roberto Salvador Santolin**  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

**Prof(a) Dr(a). Priscila Vanessa Zabala Capriles Goliatt**  
Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 17/03/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Goliatt da Fonseca, Professor(a)**, em 20/03/2023, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Salvador Santolin, Usuário Externo**, em 20/03/2023, às 16:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Priscila Vanessa Zabala Capriles Goliatt, Professor(a)**, em 20/03/2023, às 16:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Teófilo Henrique Pereira de Paula, Usuário Externo**, em 20/03/2023, às 16:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf ([www2.ufjf.br/SEI](http://www2.ufjf.br/SEI)) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1191899** e o código CRC **6EF068D9**.

---

Dedico à minha mãe, que sempre foi uma fonte inesgotável de amor, apoio e força. Uma guerreira que enfrentou desafios com coragem e determinação, sempre colocando o bem-estar da família em primeiro lugar. Sua dedicação incansável e seu sacrifício foram além do compreensível, e sou profundamente grato por tudo o que fez e continua fazendo por mim.





## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que passaram pela minha vida e deixaram marcas que me tornaram quem sou hoje. Em particular, gostaria de agradecer minha esposa Isabelle. Em cada desafio enfrentado ao longo desta jornada acadêmica, sua presença ao meu lado foi um apoio inabalável, sustentando-me com perseverança e acreditando em meu potencial, mesmo quando eu duvidava de mim mesmo. Cada vitória alcançada, cada conquista celebrada, tem um sabor ainda mais doce por poder compartilhá-las com quem amo. A luz que emana de sua presença ilumina minha vida, trazendo alegria, conforto e um profundo sentimento de realização.

Como não poderia ser diferente, gostaria de dedicar um agradecimento especial à minha mãe Josiane. Uma mulher extraordinária, guerreira e virtuosa que esteve ao meu lado em cada etapa da minha vida desempenhando um papel fundamental na minha jornada. É difícil expressar em palavras a imensidão da gratidão que sinto, pois nenhum texto é capaz de transmitir completamente a sua importância em minha vida. Como sempre digo, todas as minhas conquistas são nossas! Não posso deixar de mencionar minha irmã, Sara, e meus avós, Dirceu e Tereza, que sempre me apoiaram e suportaram de incríveis e incontáveis maneiras. Suas presenças fazem eu me sentir especial e amado.

Minha gratidão se estende a toda minha família e amigos, que sempre me elevaram e estiveram ao meu lado. Em especial, gostaria de agradecer aos amigos que conheci no Grupo de Educação Tutorial da Engenharia Computacional e no Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PGMC), cuja amizade e colaboração foram inestimáveis. Amigos que guardo no peito para o resto da vida.

Aos professores do PGMC, quero expressar minha profunda gratidão. Seus ensinamentos foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Em particular, gostaria de agradecer ao meu orientador, Leonardo Goliatt, por sua parceria dentro e fora do ambiente acadêmico. Sua orientação, paciência, disponibilidade e expertise foram fundamentais para a realização deste projeto, juntamente com o professor Teófilo, a quem esse agradecimento é estendido. Agradeço por acreditarem em mim, por me motivarem a ir além e por compartilharem seus conhecimentos e experiências de maneira generosa.

Também gostaria de agradecer à Universidade Federal de Juiz de Fora e ao PGMC por me proporcionarem essa oportunidade incrível e por toda a estrutura disponibilizada. Um agradecimento especial também é devido à FAPEMIG pelo financiamento concedido à pesquisa, que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos estes, meu mais sincero obrigado. Vocês contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal, e sou eternamente grato por todo apoio, encorajamento e inspiração que me proporcionaram ao longo dessa longa jornada.



“Na academia, o negro se fortalece,  
Palavras se tornam armas que engrandece.  
Rompendo estigmas, refutando estereótipos,  
A inserção é uma conquista, um grito de triunfo.”  
Maya Angelou



## RESUMO

A instabilidade financeira é um fenômeno complexo que pode ser causado por diversos fatores, tais como crises econômicas, flutuações nos mercados financeiros, mudanças políticas, entre outros. Quando ocorre, o sistema financeiro pode sofrer consequências graves, como a desvalorização da moeda, aumento da inflação, desemprego, e até mesmo a falência de empresas e bancos. Diante disso, é fundamental entender melhor os fatores que levam a instabilidade financeira, bem como desenvolver ferramentas e técnicas que possam ajudar a prevenir ou mitigar seus efeitos. Este trabalho tem como propósito reproduzir um sistema financeiro sob incerteza keynesiana, composto por agentes heterogêneos que interagem entre si, visando estudar o comportamento agregado do sistema com foco na instabilidade financeira. Para isso, são utilizados modelos baseados em agentes para simular a interação nesse sistema complexo, combinando métodos inteligentes que auxiliam na tomada de decisão dos agentes, como aprendizado por reforço, algoritmos de colônia de formigas e agrupamento. Dessa forma, é proposto uma heurística que integra diferentes técnicas computacionais, com o objetivo de entender os impactos gerados para a estabilidade financeira desse sistema. A heurística é aplicada em um agente específico do modelo e introduz um elemento de “auto-regulação” financeira no sistema, alinhado com as definições dos acordos de Basileia. Além disso, ferramentas de análise de sensibilidade são empregadas para compreender o impacto dos parâmetros exógenos a este modelo de sistema financeiro. Espera-se que este trabalho possa contribuir para uma melhor compreensão do comportamento dos agentes no contexto financeiro, especialmente quando ferramentas computacionais são inseridas para testar conceitos teóricos da área de Economia.

Palavras-chave: Instabilidade financeira. Modelo baseado em agentes. Inteligência artificial.



## ABSTRACT

Financial instability is a complex phenomenon that can be caused by various factors, such as economic crises, fluctuations in financial markets, political changes, among others. When it occurs, the financial system can suffer serious consequences, such as currency devaluation, increased inflation, unemployment, and even the bankruptcy of companies and banks. Therefore, it is essential to better understand the factors that lead to financial instability, as well as to develop tools and techniques that can help prevent or mitigate its effects. This work aims to reproduce a financial system under Keynesian uncertainty, composed of heterogeneous agents that interact with each other, with the purpose of studying the aggregate behavior of the system with a focus on financial instability. To do so, agent-based models are used to simulate the interaction in this complex system, combining intelligent methods that assist agents in decision-making, such as reinforcement learning, ant colony algorithm, and clustering. In this way, a heuristic is proposed that integrates different computational techniques, with the objective of understanding the impacts generated on the financial stability of this system. The heuristic is applied to a specific agent of the model and introduces an element of financial "self-regulation" in the system, aligned with the definitions of the Basel accords. Additionally, sensitivity analysis tools are employed to understand the impact of exogenous parameters on this financial system model. It is expected that this work can contribute to a better understanding of agent behavior in the financial context, especially when computational tools are inserted to test theoretical concepts in the area of Economics.

Keywords: Financial instability. Agent-based model. Artificial Intelligence.





## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comportamento dos agentes em um ambiente . . . . .	30
Figura 2 – Representação do esquema do aprendizado por reforço . . . . .	32
Figura 3 – Processo de otimização por colônia de formiga . . . . .	34
Figura 4 – Exemplo de um diagrama de Voronoi . . . . .	36
Figura 5 – Exemplo de agrupamento em 4 grupos . . . . .	37
Figura 6 – Processo de clusterização usando <i>K-means</i> com $k = 3$ . . . . .	38
Figura 7 – Processo de análise de sensibilidade usando o método de Monte Carlo .	41
Figura 8 – Esquema do modelo de sistema financeiro através dos diferentes tipos de agentes ativos . . . . .	46
Figura 9 – Fluxo de trabalho do modelo . . . . .	47
Figura 10 – Esquema da construção do modelo matemático . . . . .	58
Figura 11 – Fluxograma do funcionamento da heurística inserida no modelo matemático . . . . .	59
Figura 12 – Fluxo utilizado para encontrar o “regime financeiro principal” das firmas no tempo $t$ utilizando a combinação de aprendizado por reforço com recompensas baseadas no algoritmo de colônia de formigas . . . . .	60
Figura 13 – Exemplo do funcionamento do diagrama de Voronoi . . . . .	62
Figura 14 – Comparação da fragilidade financeira . . . . .	67
Figura 15 – Comparação da quantidade de firmas por abordagem . . . . .	68
Figura 16 – Composição do sistema por tipo de regime financeiro das firmas . . . .	70
Figura 17 – Comparação do preço praticado médio observado . . . . .	71
Figura 18 – Variáveis comportamentais do lado do banco (a) Capital do banco (b) Preço limite para concessão de financiamento . . . . .	71
Figura 19 – Comportamento de investimento do banco . . . . .	72
Figura 20 – Comparação do rendimento das aplicações do banco em títulos públicos	73
Figura 21 – Comparação da taxa de juros de mercado . . . . .	74
Figura 22 – Comparação da atribuição de firmas do tipo Hedge pelo sistema e pela heurística . . . . .	76
Figura 23 – Análise de sensibilidade do modelo utilizando Monte Carlo . . . . .	79
Figura 24 – Fluxo de execução do modelo . . . . .	89



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Regras decisórias utilizadas para o cálculo da expectativa de demanda.	49
Tabela 2 – Parâmetros utilizados no Monte Carlo. . . . .	63
Tabela 3 – Valores utilizados nos parâmetros que são constantes . . . . .	65
Tabela 4 – Valores utilizados como condições iniciais . . . . .	66
Tabela 5 – Parâmetros extraídos na etapa da rotulação de firmas Hedge pelo aprendizado por reforço . . . . .	77
Tabela 6 – Resultados obtidos com as simulações utilizando o método de Monte Carlo	78



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>21</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DE TRABALHOS RELACIONADOS . . . . .	23
1.2	OBJETIVOS . . . . .	25
1.3	RELEVÂNCIA DO TRABALHO . . . . .	26
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO . . . . .	26
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS . . . . .</b>	<b>29</b>
2.1	MODELO BASEADO EM AGENTES . . . . .	29
<b>2.1.1</b>	<b>LSD - <i>Laboratory for Simulation Development</i> . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Aprendizado por Reforço . . . . .</b>	<b>31</b>
2.2	MODELOS BIOINSPIRADOS . . . . .	32
<b>2.2.1</b>	<b>Otimização por colônia de formigas . . . . .</b>	<b>33</b>
2.3	DIAGRAMA DE VORONOI . . . . .	36
<b>2.3.1</b>	<b>Agrupamento . . . . .</b>	<b>37</b>
<i>2.3.1.1</i>	<i>K-means . . . . .</i>	<i>38</i>
2.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE . . . . .	39
<b>2.4.1</b>	<b>Monte Carlo . . . . .</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>MODELO E EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS . . . . .</b>	<b>43</b>
3.1	PROPOSTA DO MODELO . . . . .	43
3.2	MODELO MATEMÁTICO . . . . .	44
<b>3.2.1</b>	<b>Fluxograma de informações . . . . .</b>	<b>46</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Modelo base . . . . .</b>	<b>48</b>
<i>3.2.2.1</i>	<i>Definições do agente tecnologia . . . . .</i>	<i>48</i>
<i>3.2.2.2</i>	<i>Definições do agente firma: demanda por financiamento . . . . .</i>	<i>49</i>
<i>3.2.2.3</i>	<i>Definições do agente banco: aplicação e financiamento . . . . .</i>	<i>51</i>
<i>3.2.2.4</i>	<i>Definições do agente firma: produção e preço . . . . .</i>	<i>52</i>
<i>3.2.2.5</i>	<i>Definições do agente firma: competitividade e market share . . . . .</i>	<i>53</i>
<i>3.2.2.6</i>	<i>Definições do agente firma: avaliação da oferta e demanda . . . . .</i>	<i>54</i>
<i>3.2.2.7</i>	<i>Definições do agente firma: regimes financeiros . . . . .</i>	<i>54</i>
<i>3.2.2.8</i>	<i>Definições do agente banco: financiamento à entrada e racionamento de crédito . . . . .</i>	<i>56</i>
<i>3.2.2.9</i>	<i>Definições do agente banco: determinação do spread bancário . . . . .</i>	<i>57</i>
<b>3.2.3</b>	<b>Heurística para entrada de novas firmas . . . . .</b>	<b>58</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Análise de sensibilidade de parâmetros usando Monte Carlo . . . . .</b>	<b>63</b>
3.3	EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS . . . . .	64
<b>3.3.1</b>	<b>Experimentos na análise de sensibilidade com Monte Carlo . . . . .</b>	<b>66</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>67</b>
4.1	RESULTADOS DO MODELO PROPOSTO . . . . .	67

4.2	ANÁLISE DOS COMPONENTES DA HEURÍSTICA . . . . .	75
4.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE . . . . .	77
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>81</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	82
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE A – FLUXO DE ATRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS DO</b>	
	<b>MODELO . . . . .</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Modelos econômicos são instrumentos valiosos para a compreensão das relações entre as variáveis econômicas e ajudam a prever os efeitos decorrentes de mudanças em uma ou mais delas [1]. Além disso, tais modelos são importantes ferramentas para pesquisa empírica, permitindo a comparação e quantificação de diferentes teorias da Economia. Estes modelos são amplamente utilizados para a previsão e avaliação de diferentes cenários econômicos, possibilitando, entre outras coisas, o planejamento de políticas públicas [2].

Crises financeiras são recorrentes nas economias capitalistas e muitas das vezes implicam efeitos adversos sobre o emprego e a renda. Por isso, no âmbito do pensamento econômico, muitos modelos têm sido desenvolvidos para explicar o fenômeno e assim propor soluções para evitar ou atenuar seus efeitos. Dentre esses modelos, aqueles de natureza keynesiana<sup>1</sup> tem ganhado cada vez mais adeptos nos últimos tempos, particularmente a partir da crise de 2008, que teve início nos Estados Unidos, mas se espalhou amplamente pelo globo. Mais especificamente, a explicação proposta por Minsky [4], a partir da Hipótese da Instabilidade Financeira (HIF), tem se tornado um dos grandes referenciais teóricos sobre o tema, influenciando a tomada de decisão por parte dos formuladores de política econômica.

A HIF parte do pressuposto de que a economia passa por ciclos de expansão e contração, sendo que o período de expansão é caracterizado por um aumento da confiança dos investidores e da alavancagem financeira. No entanto, esse aumento de confiança pode levar a um excesso de endividamento e, conseqüentemente, à inadimplência e à falência de empresas. A HIF propõe que a instabilidade financeira é um fenômeno intrínseco ao capitalismo e que, portanto, é necessária uma intervenção do Estado para evitar ocorrência ou amenizar os efeitos de crises financeiras. Esse modelo tem sido cada vez mais utilizado por economistas que buscam entender as causas das crises financeiras e propor políticas para preveni-las [5].

A instabilidade financeira é um desafio comum para as nações em todo o mundo. É de suma importância para a saúde econômica encontrar maneiras de controlá-la para, entre outros motivos, mitigar a possibilidade de crises financeiras, pois estas podem ter efeitos econômicos profundos e duradouros, incluindo recessão, aumento do desemprego, queda na renda e instabilidade social [6]. A teoria econômica destaca ainda que incertezas econômicas podem levar a instabilidade financeira, causando impactos negativos na economia [7]. Portanto, governos e bancos devem tomar medidas para garantir a estabilidade financeira, mesmo diante de possíveis mudanças na economia, implementando políticas e estratégias

---

<sup>1</sup> Refere-se à teoria econômica desenvolvida por John Maynard Keynes, que se baseia na ideia de que as flutuações econômicas são resultado de desequilíbrios no sistema e não de ajustes automáticos no mercado [3].

adequadas [8]. Uma economia estável pode ser vista como aquela em que a oferta e demanda de bens e serviços estão equilibradas, o que significa que o governo deve controlar a inflação mantendo taxas de juros estáveis [3]. Com a adoção de medidas adequadas para manter a estabilidade financeira, as nações podem garantir o crescimento econômico sustentável e prevenir crises financeiras prejudiciais.

Os modelos de filiação keynesiana, tais como o proposto por Minsky [4] tem como característica principal a presença da “incerteza no seu sentido forte” [9], isto é, aquela cujos eventos não podem ser descritos por uma distribuição de probabilidade passível de ser conhecida impedindo, portanto, a sua transformação em risco quantificável. Como destaca Kindleberger [10] em seu livro clássico “Manias, pânico e crises” comportamentos coletivos de natureza subjetiva encontram-se invariavelmente na origem das crises financeiras. Estes contaminam a tomada de decisão e, do ponto de vista empírico, colocam em xeque a utilização dos instrumentos tradicionais de estatística para o tratamento do problema. No sentido de se contornar tais obstáculos tem crescido a utilização de modelos de simulação baseados em agentes como uma alternativa para a abordagem da questão.

No Modelo Baseado em Agentes (MBAs), um agente observa o funcionamento de um ambiente, processa as informações disponíveis e toma uma determinada ação que altera o estado do ambiente em que está inserido, gerando uma consequência que influencia as tomadas de decisões futuras [11]. Os agentes podem ser programados com diferentes níveis de complexidade, desde simples regras de decisão até algoritmos de aprendizado de máquina, permitindo que os modelos baseados em agentes sejam utilizados para simular e analisar sistemas complexos [12]. Uma outra possibilidade é a integração de modelos baseados em agentes com o uso de Inteligência Coletiva, como é o caso da otimização baseada em colônia de formigas [13].

A integração entre modelos baseados em agentes e Inteligência Artificial (IA) começaram a ganhar espaço na modelagem e simulação de problemas econômicos, permitindo a incorporação de comportamentos individuais e estratégias mais robustas na tomada de decisão de agentes financeiros, principalmente com o uso de aprendizado por reforço [14]. Porém, essa integração já acontece com mais frequência em diferentes áreas do conhecimento [15, 16]. Diferentemente de modelos econômicos convencionais, os ABMs permitem a interação entre os agentes e levam em consideração as heterogeneidades e assimetrias dos agentes financeiros [17]. Além disso, a IA pode ser utilizada para o desenvolvimento de algoritmos de aprendizado de máquina que aprimoram a precisão e a eficiência desses modelos. Essas abordagens permitem uma melhor compreensão dos sistemas financeiros e podem ajudar na formulação de políticas que visem a manutenção da instabilidade financeira [18].

Por fim, é importante destacar que a análise de sensibilidade é um componente que geralmente acompanham as simulações de modelos baseados em agentes [19, 20]. Essa



abordagem permite que os pesquisadores examinem como diferentes condições iniciais e parâmetros afetam o comportamento do sistema modelado. A análise de sensibilidade é essencial para avaliar a robustez e a confiabilidade dos resultados do modelo e pode fornecer *insights* valiosos sobre a dinâmica do sistema em questão [21]. Além disso, a análise de sensibilidade também pode ajudar a identificar quais fatores têm maior impacto no comportamento de um sistema, orientando a direção de pesquisas.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DE TRABALHOS RELACIONADOS

Essa Seção busca contextualizar os trabalhos que vão na linha do uso de modelos baseados em agentes na economia, desde seu embasamento teórico inicial até modelos mais recentes que inserem o uso de inteligência artificial para a tomada de decisão de seus agentes.

No início deste capítulo foi discutido sobre a Hipótese de Instabilidade Financeira (HIF). Em seu trabalho, Paula [22] considera o pensamento minskyano como uma corrente pós-keynesiana, destacando que a abordagem de Keynes para a compreensão do papel dos bancos na economia é corroborada pela visão de Minsky. Na visão de Keynes [3], os bancos têm o poder de criar moeda por meio da concessão de crédito, o que pode influenciar o nível geral de atividade econômica, principalmente considerando um ambiente de incertezas. Keynes também enfatiza a importância da regulação financeira para evitar crises econômicas. Além disso, o trabalho de Keynes [3] aborda a teoria da preferência pela liquidez, onde os agentes econômicos preferem manter uma certa quantidade de recursos em forma líquida, como dinheiro, mesmo que isso signifique receber uma remuneração menor do que se investissem em outras formas de ativos financeiros. Já Minsky, ampliou a compreensão sobre a importância do setor financeiro para a economia e argumentou que o sistema financeiro é intrinsecamente instável e que as crises são um elemento inerente ao funcionamento desse sistema. Minsky [4] propõe um modelo de análise que considera o comportamento dos bancos e a postura financeira dos agentes econômicos como fatores determinantes para o funcionamento do sistema financeiro.

Já na década de 1990, alguns autores como Holland & Miller [23] introduziram a modelagem de problemas econômicos usando sistemas complexos compostos por uma rede de agentes, cuja dinâmica e comportamento agregado emergem das atividades individuais. Em tais sistemas, um agente é considerado adaptativo se suas ações no ambiente podem ser avaliadas por um valor e se ele comportar de forma adaptativa para aumentar esse valor ao longo do tempo. Esses sistemas exibem vários níveis de agregação, organização e interação, cada um com sua própria dinâmica e comportamentos específicos. Cada nível pode ser visto como um nicho local, que pode ser explorado por adaptações específicas. No entanto, devido à grande quantidade de nichos existentes, é difícil para um agente explorar todos simultaneamente, o que leva a uma busca local da informação. Contudo,

com novas adaptações, os agentes podem criar ou modificar nichos. Como resultado, esses sistemas evoluem continuamente e operam longe de qualquer ótimo global que possa ser alcançado através de cálculos individualizados.

Com a introdução de agentes para problemas econômicos, algumas pesquisas começaram a surgir pautando o uso de métodos baseados em agentes para o problema da instabilidade financeira de Minsky. Gallegati *et. al* [24] apresenta um modelo de simulação baseado em agentes para investigar como a fragilidade financeira e a dinâmica industrial é afetada por flutuações econômicas. O objetivo é verificar se o uso de modelos baseados em agentes podem replicar regularidades empíricas. O modelo inclui empresas que competem entre si em um mercado de bens, onde cada empresa tem seu próprio modelo de negócios e estratégia de produção. O autor cita que o modelo é elaborado de forma simples, onde existem apenas dois tipos de mercados: bens e crédito. Contudo, os resultados mostram que o modelo é capaz de imitar regularidades observadas na economia real, o que indica que os modelos baseados em agentes tem uma base sólida na microeconomia e pode ser usado para entender melhor as dinâmicas de mercado em um sistema de agentes agregados, observando que este pode ser estendido para incorporar outras variáveis, como a demanda agregada, diferentes graus de poder de mercado nos mercados de bens e crédito, variáveis de política e processos de aprendizagem.

O trabalho de De Paula [25] discorre sobre a instabilidade mais especificamente sob a perspectiva minskyana, demonstrando a modelagem de processos financeiro-produtivos com agentes heterogêneos, destacando a importância do tratamento da incerteza no seu sentido fundamental. O ambiente onde se dá a interação entre o sistema financeiro e produtivo é permeado por incerteza forte e surge do fato de que os resultados do investimento só podem ser conhecidos em um período futuro. A perspectiva de apropriação de parte dos lucros na produção é o que move as atividades de financiamento. Neste sentido, é proposto um modelo econômico simplificado onde há um único banco que oferece crédito bancário para firmas que demandam recursos. A concessão de crédito depende da percepção de risco do banco, que pode variar desde uma oferta infinitamente elástica<sup>2</sup> até uma situação de racionamento total de crédito. Os recursos não concedidos em empréstimos são aplicados em títulos do governo, cujo rendimento é dado pela taxa básica de juros definida pela autoridade monetária. O juro cobrado nas operações de crédito corresponde à taxa básica mais o *spread* bancário<sup>3</sup>, que é reajustado a cada período de acordo com a percepção de risco sistêmico. Como resultado, o trabalho mostrou que a evolução do sistema foi caracterizada por crises financeiras endógenas e instabilidades.

---

<sup>2</sup> Situação de mercado em que os consumidores adquirem a quantidade que puderem de um certo bem a um determinado preço; a qualquer preço mais alto do que este, a demanda cai para zero; a qualquer preço mais baixo, a demanda aumenta limitadamente[26].

<sup>3</sup> O *spread* bancário é a diferença entre a taxa de juros a que um banco empresta dinheiro a outros bancos ou instituições financeiras e a taxa de juros a que ele cobra por empréstimos a pessoas físicas ou empresas [27].

A literatura mostra que trabalhos que estudam a instabilidade financeira com o uso de modelos baseados em agentes surgiram com mais frequência a partir de 2010 com a popularização de ferramentas computacionais. Trabalhos como o de Cincotti, Raberto & Teglio [28] destacam a importância do crédito na economia e como ele pode levar a ciclos econômicos, ao explorar como a concessão de crédito pelos bancos afeta a estabilidade econômica. Neste sentido, o trabalho de Lengnick & Hans-Werner [29] insere uma nova complexidade aos modelos criando uma rede de crédito. Os autores também analisam o papel das políticas monetárias e regulatórias na estabilização da economia e prevenção de crises financeiras. Outros trabalhos mais recentes continuam a explorar a o comportamento agregado do sistema econômico com a adição de comportamentos interbancários, como é o caso dos trabalhos de Dosi *et al.* [30] e Popoyan, Napoletano & Roventini [31].

Alguns dos trabalhos mais recentes que abordam modelos baseados em agentes para problemas econômicos começam a utilizar de métodos de otimização com inteligência artificial e computacional, como é o caso dos trabalhos de Polyzos, Samitas, & Katsaiti [14], Catullo, Gallegati & Russo [32] e Chen *et al.* [33]. Já no sentido dos trabalhos mais focados na instabilidade financeira, além de esforços em modelos mais robustos e complexos para representar o sistema financeiro, ainda há o uso de análise de sensibilidade de parâmetros, como é o caso de Peters *et al.* [34].

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é investigar como a aplicação de uma heurística, composta por métodos de Inteligência Artificial, em conjunto com modelos baseados em agentes, pode contribuir para uma melhor compreensão das crises financeiras, além de auxiliar na formulação de estratégias de prevenção e mitigação dessas instabilidades. Sendo assim, espera-se entender se a incorporação de inteligência ao agente responsável pelo Sistema Bancário no modelo, permitindo que tome decisões baseadas em aprendizado contínuo, pode promover maior estabilidade do sistema em comparação com o trabalho de De Paula [25], no qual os agentes do modelo se baseiam apenas em regras de decisão simples e estocásticas. Portanto, a hipótese central deste trabalho é que a introdução de uma heurística na tomada de decisão, no âmbito da instituição bancária, é capaz de reproduzir melhorias na estabilidade financeira do sistema.

Além disso, os objetivos específicos são:

- O1) Reproduzir o modelo proposto por De Paula [25] que representa um sistema financeiro por meio de um Modelo Baseado em Agentes;
- O2) Testar a utilização de métodos de Inteligencia Artificial, no âmbito da tomada de decisão privada, a partir de um exemplo específico;

- O3) Analisar se a aplicação da heurística afeta a composição dos tipos de empresas que compõem o sistema financeiro;
- O4) Avaliar a sensibilidade do modelo através da variação de parâmetros exógenos.

### 1.3 RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Este trabalho surge da crescente necessidade de abordagens multidisciplinares na pesquisa acadêmica, que buscam integrar diferentes áreas de conhecimento para promover avanços científicos [35]. Nesse sentido, este estudo se concentra na interdisciplinaridade entre as áreas de Modelagem Computacional, Ciência da Computação, Economia, Matemática e Estatística, com o objetivo de utilizar técnicas computacionais para validar, discutir e avançar em teorias sobre instabilidade financeira na Economia.

A interdisciplinaridade é fundamental porque permite que diferentes especialistas colaborem e contribuam com suas perspectivas únicas, integrando conhecimentos para fornecer soluções mais robustas e inovadoras para problemas complexos. Na pesquisa sobre instabilidade financeira, a interdisciplinaridade pode trazer benefícios significativos, já que o fenômeno é influenciado por fatores econômicos, políticos e sociais, entre outros, e requer uma compreensão multifacetada para ser adequadamente abordado.

Ao utilizar técnicas das diferentes áreas mencionadas, este trabalho busca contribuir com as linhas de pesquisas sobre instabilidade financeira de forma interdisciplinar, ao propor um acoplamento de uma heurística composta por métodos de IA em um agente específico do modelo, verificando o comportamento agregado do sistema financeiro em questão. A contribuição central do trabalho reside na introdução de métodos computacionais na tomada de decisão do setor privado do sistema, visando avançar computacionalmente o modelo proposto e discutido por De Paula [25]. A proposta é, então, verificar se o uso desses métodos é capaz de promover um sistema financeiro mais sólido em comparação ao trabalho de referência mencionado. Esta proposta vai de encontro à tendência verificada nos Acordos de Basileia<sup>4</sup> de incentivo à chamada “auto-regulação”, isto é, aquela que confia aos bancos o controle dos níveis dos indicadores de liquidez e solvência [37].

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este estudo está estruturado em 5 capítulos conforme a seguir:

---

<sup>4</sup> Conjunto de regulamentações internacionais que estabelecem diretrizes para a gestão de riscos e a adequação de capital dos bancos. Eles foram desenvolvidos pelo Comitê de Basileia, composto por representantes de autoridades reguladoras e bancos centrais de diferentes países. Os acordos têm como objetivo promover a estabilidade e a solidez do sistema financeiro global, estabelecendo padrões mínimos de capitalização e exigências de liquidez para os bancos. Eles também abordam questões como a avaliação de riscos, a transparência das informações financeiras e a governança corporativa [36].

- (i) Introdução: este capítulo apresenta as ideias iniciais sobre o tema de estudo, contextualizando as ferramentas e problemas abordados, além de uma revisão bibliográfica das principais literaturas sobre o tema, com o objetivo de situar o leitor sobre os trabalhos já realizados na área;
- (ii) Material e Métodos: este capítulo apresenta o material utilizado e os principais métodos empregados para a construção deste trabalho;
- (iii) Modelo e Experimentos Computacionais: este capítulo detalha a modelagem construída para representar o sistema financeiro, além de apresentar detalhes da heurística proposta e o arcabouço utilizado para realização dos experimentos computacionais;
- (iv) Resultados e Discussões: este capítulo apresenta os principais resultados obtidos com o trabalho e propõe discussões acerca dos tópicos demonstrados;
- (v) Conclusão e Trabalhos Futuros: este capítulo finaliza o trabalho trazendo as conclusões encontradas para todo o estudo proposto, além de discutir novas linhas de trabalhos futuros a partir deste estudo.



## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo discute os principais componentes utilizados e baseados para a construção do atual trabalho. Aqui são demonstrados tanto o material necessário para a elaboração deste trabalho, quanto os diferentes métodos que compõem a construção do modelo e sua estrutura de análise.

A proposta geral do trabalho passa pela apresentação de um modelo computacional baseado em agentes que descreve a interação de múltiplos agentes heterogêneos sob um sistema financeiro, conforme descrito por De Paula [25]. A partir deste modelo, é proposto a inserção de métodos computacionais para avaliação posterior dos resultados. O uso de modelos baseados em agentes permite uma abordagem *bottom-up*, onde cada agente é modelado de forma individual e as suas interações são estudadas para entender como eles afetam o comportamento geral do sistema [11, 38, 39]. Isso permite explorar a evolução do sistema conforme os agentes interagem e os passos de tempo avançam.

Os métodos aqui descritos são utilizados em conjunto para explorar avanços na área de Economia, que podem ser feitos com o auxílio de ferramentas computacionais. Segundo Cicogna [40], o processo adaptativo dos agentes às mudanças de mercado demonstram que os modelos baseados em agentes são ferramentas adequadas para o estudo dos mesmos e permitem captar peculiaridades dos mercados não incorporadas em outras pesquisas da área que não se utilizam desses mecanismos. Esses modelos permitem simular cenários hipotéticos e avaliar diferentes políticas e intervenções.

### 2.1 MODELO BASEADO EM AGENTES

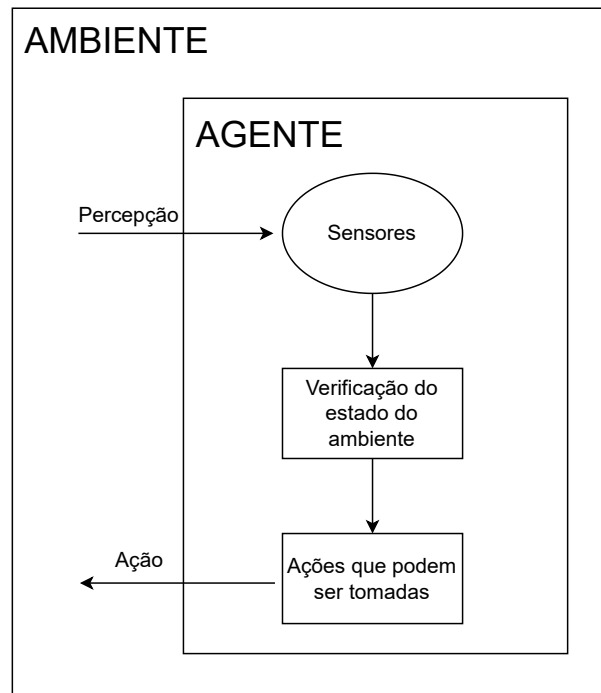
Atualmente, a busca pela construção de modelos computacionais que tem como objetivo aproximar, representar e simular a realidade é cada vez mais comum em diversas áreas do conhecimento, como matemática, física, engenharia, economia, entre outras. Dessa forma, diversos tipos e classes de modelos são criados, como é o exemplo das simulações de Modelos Baseado em Agentes (MBAs).

Os Modelo Baseado em Agentes está contido no campo da Inteligência Artificial<sup>5</sup> e pode ser descrito como um sistema (ou ambiente) onde diferentes entidades, chamadas de agentes, interagem com o sistema e/ou entre si. Cada agente é regido por um conjunto de informações, regras e ações que o fazem mudar de estado dentro do ambiente. Os agentes podem ser denominados como inteligentes, pois suas tomadas de decisão são causadas através da observação do ambiente e de outros agentes ali presentes [42]. A Figura 1 demonstra o processo de tomada de decisão dos agentes.

---

<sup>5</sup> Inteligência Artificial pode ser definido como sistemas (ou até mesmo máquinas) que executam tarefas emulando a inteligência humana, podendo passar por aprimoramentos iterativos com base nas informações coletadas por eles [41].

Figura 1 – Comportamento dos agentes em um ambiente



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O agente observa o funcionamento do ambiente para que uma determinada ação seja tomada. Essa ação gera uma consequência que altera o estado do ambiente, de tal forma que na próxima iteração essa mudança influencie em uma nova tomada de decisão pelos agentes que integram o sistema.

### 2.1.1 LSD - *Laboratory for Simulation Development*

Existem várias ferramentas para a representação computacional dos Modelos Baseados em Agentes. Uma dessas ferramentas é o LSD (*Laboratory for Simulation Development*).

O LSD é uma linguagem de programação código livre, cuja construção é baseada em macros acima de uma camada da linguagem de programação C++, a qual permite aproveitar os benefícios da linguagem como velocidade, integração com as estruturas de dados e bibliotecas [43].

Relatado por Valente & Andersen [44], o LSD pode ser dividido em duas partes. A primeira parte diz respeito ao desenvolvimento de código na linguagem de programação, utilizando tanto os recursos das macros configuradas, quanto recursos advindos da estrutura do C++. A preocupação nesse estágio fica a cargo do comportamento dos agentes, de como suas ações serão estabelecidas e de todas as equações que regem o modelo. A segunda parte é sobre o gerenciamento de entrada e saída do modelo, a qual é feita via interface gráfica.



Apesar de ser uma linguagem de programação, o LSD fornece essa interface gráfica para que os usuários sejam capazes de configurar as suas simulações sem se aprofundar no rigor técnico para a execução de um programa construído em C++, sua linguagem base. Como mencionado por Tisue & Wilensky [45], a utilização de interfaces gráficas é uma tendência crescente na simulação baseada em agentes, pois permite que usuários sem conhecimentos profundos de programação possam configurar e executar simulações. Além disso, o LSD permite que descrições e experimentos estatísticos sejam realizados, bem como possibilita execuções de simulações em paralelo e uma análise dos resultados com a geração de gráficos, os quais podem ser exportados com facilidade [44].

Em resumo, o LSD é uma ferramenta valiosa para a representação computacional de modelos baseados em agentes, pois combina velocidade e eficiência do C++ com a praticidade de uma interface gráfica. Como descrito por Valente [43, 44], esses recursos fazem com que o uso da ferramenta para a solução de problemas de Modelos Baseados em Agentes se torne uma possibilidade viável. Além disso, a possibilidade de utilização de interface gráfica integrada faz do LSD uma opção atrativa para pesquisadores e estudantes em áreas como economia, física, engenharia, entre outras, que buscam simular e analisar sistemas complexos através de modelos baseados em agentes.

### 2.1.2 Aprendizado por Reforço

O aprendizado por reforço é um ramo da Inteligência Artificial que se preocupa com como um agente pode aprender a tomar decisões em um ambiente dinâmico para maximizar uma recompensa cumulativa ao longo do tempo [46]. O agente deve aprender a escolher ações que levem a recompensas positivas e evitar ações que levem a recompensas negativas. Esse tipo de aprendizado é inspirado em como os seres humanos e outros animais aprendem com a experiência para tomar decisões melhores.

Um dos principais benefícios do aprendizado por reforço em modelos baseados em agentes é que ele permite que o agente aprenda a tomar decisões otimizadas em situações complexas, imprevisíveis e com a presença de incertezas ou aleatoriedades no ambiente. Isso é particularmente útil em aplicações do mundo real, onde é difícil prever todas as possíveis situações que o agente pode enfrentar. Por exemplo, o aprendizado por reforço pode ser usado para treinar um agente em um jogo em que as ações do jogador adversário são desconhecidas, ou para ensinar um robô a navegar em um ambiente desconhecido [47].

No entanto, a implementação de modelos baseados em agentes e o aprendizado por reforço pode ser desafiadora, pois o desempenho do agente depende da escolha adequada de parâmetros, como a taxa de aprendizado e o fator de desconto. Além disso, pode haver desafios na definição de recompensas adequadas para o agente, o que pode afetar significativamente o desempenho do agente.

Uma das equações mais importantes que descrevem o aprendizado por reforço é a

equação de Bellman [47]:

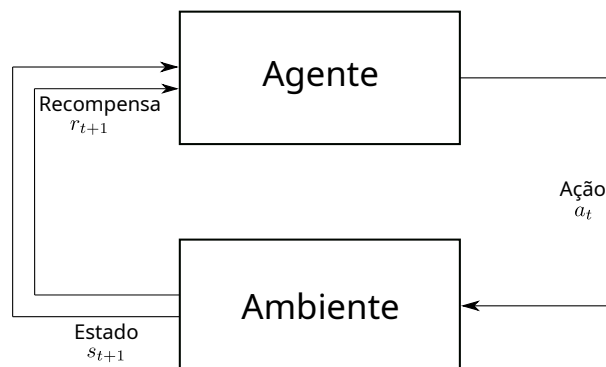
$$V^*(s) = \max_{a'} \sum_s T(s, a, s') [R(s, a, s') + \gamma V^*(s')] \quad (2.1)$$

onde, sabendo que o agente escolhe a ação  $a$ ,

- $T(s, a, s')$  é a probabilidade de transição do estado  $s$  para o estado  $s'$ ;
- $R(s, a, s')$  é a recompensa de transição do estado  $s$  para o estado  $s'$ ;
- $\gamma$  um fato de desconto

Por fim, a Figura 2 demonstra o fluxo de funcionamento do algoritmo de aprendizado por reforço. É possível observar que o agente toma uma ação  $a$  para interagir com o ambiente que o faz transitar de estado e obter uma recompensa a cada passo de tempo.

Figura 2 – Representação do esquema do aprendizado por reforço



Fonte: Adaptado de Galatzer-Levy, Ruggles & Chen [48]

## 2.2 MODELOS BIOINSPIRADOS

A natureza pode ser considerada como uma fonte de inspiração para o desenvolvimento de técnicas computacionais que visam resolver problemas complexos, pois, segundo Yang [49], a natureza é uma fonte inesgotável de inspiração para a ciência e a tecnologia. Como resultado, surgiu uma área de estudos conhecida como Computação Natural, que busca aplicar conceitos e mecanismos encontrados na natureza para solucionar problemas práticos de diversos tipos. Essa área é dividida em três ramificações principais:

- Computação inspirada na natureza (bioinspirada);
- Simulação e emulação de fenômenos naturais;
- Computação utilizando meios e materiais naturais.

Cada ramificação abriga diversas correntes de estudos, como Computação Evolucionária, Inteligência Coletiva, Redes Neurais Artificiais, entre outras. Neste trabalho, é destacado a Inteligência Coletiva, a qual é observada de forma emergente quando um sistema é operado por dois ou mais indivíduos e as ações de um indivíduo afetam a percepção ou comportamento tanto dele quanto do grupo [50]. Quando esses efeitos são observados pelo grupo como um todo, ocorre um fenômeno coletivo que altera a percepção global dos indivíduos.

Os modelos bioinspirados têm se mostrado eficazes em uma variedade de aplicações computacionais. Um exemplo é o uso de algoritmos inspirados na evolução biológica aplicados a problemas de otimização, como o Algoritmo Genético e a Otimização por Colônia de Formigas, os quais imitam o processo de evolução natural para encontrar soluções ótimas para problemas complexos [51]. Outro exemplo é o uso de redes neurais inspiradas na biologia para reconhecimento de padrões e aprendizado de máquina. Essas redes, chamadas de Redes Neurais Artificiais, se baseiam na estrutura e função das redes neurais biológicas para realizar tarefas complexas, como reconhecimento de faces e processamento de linguagem natural [52]. A inteligência coletiva também tem sido aplicada em problemas de tomada de decisão em sistemas distribuídos, onde ações individuais são tomadas tendo em conta o contexto e a informação disponíveis no grupo, visando atingir um objetivo coletivo [50].

### 2.2.1 Otimização por colônia de formigas

Conforme anteriormente detalhado, a inteligência coletiva é um conceito que se baseia na capacidade de um grupo de indivíduos trabalhar juntos para alcançar objetivos comuns, sem a necessidade de uma liderança centralizada [53]. Um exemplo clássico desse fenômeno é o da colônia de formigas [54].

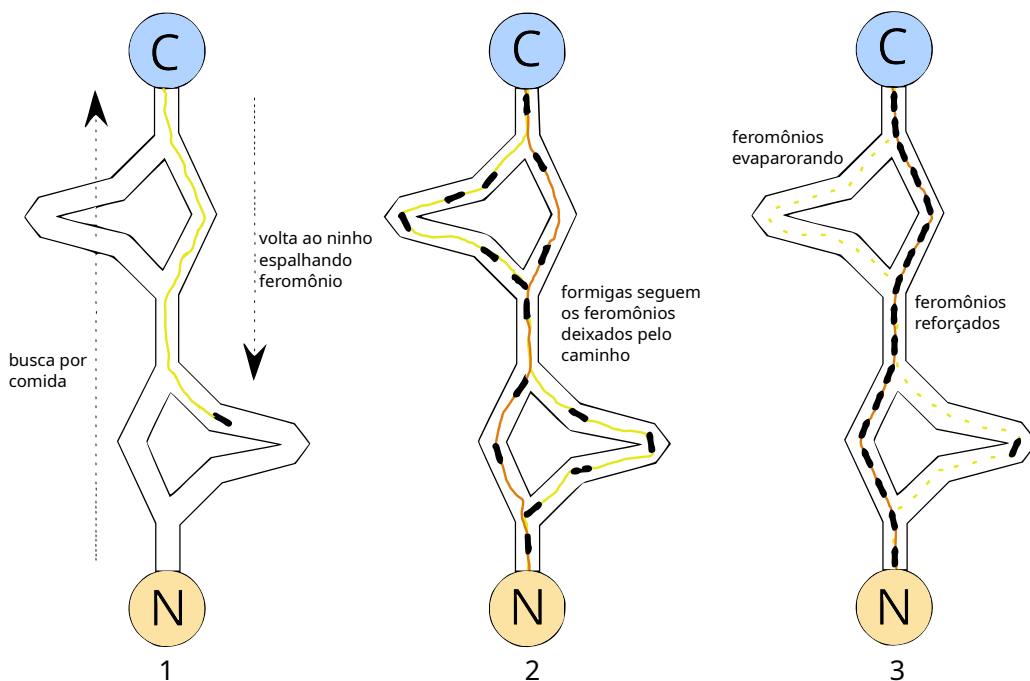
As formigas são insetos sociais que se organizam em colônias para realizar tarefas como a busca por alimentos e a construção de formigueiros. Esse comportamento coletivo é possível graças à capacidade das formigas de comunicarem-se entre si através de feromônios [55]. Os feromônios são substâncias químicas que as formigas depositam ao longo de sua trilha de forma a indicar a presença de comida ou outros recursos importantes. Quanto maior a concentração de feromônios em uma determinada trilha, maior a probabilidade de outras formigas seguirem por ela [56].

É possível simular esse comportamento de formigas em computadores através de um algoritmo conhecido como Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization - ACO*) [55]. Esses algoritmos se baseiam na ideia de que as formigas são capazes de encontrar o melhor caminho entre dois pontos através de uma busca heurística, depositando feromônios ao longo do caminho e seguindo a trilha com maior concentração de feromônios [56]. De forma prática, Dorigo & Birattari [55] descrevem os passos tomados pelas formigas

da seguinte forma:

- Inicialmente não há feromônios em nenhum dos possíveis caminhos. As formigas adotam aleatoriamente uma rota;
- Os caminhos escolhidos passam a ter um pouco mais de feromônio depositado pela formiga que realizou o trajeto;
- As trilhas com mais feromônios passam a ter uma maior possibilidade de que outras formigas sigam;
- A tendência é que, com o passar do tempo, as rotas com menor tamanho sejam aquelas que terão maior concentração de feromônio;
- O feromônio das rotas evapora com o passar do tempo;
- Caminhos mais fracos e longos acabam sendo apagados com o passar do tempo e da evaporação da substância.

Figura 3 – Processo de otimização por colônia de formiga



Fonte: Adaptado de Liu, Cao & Li [57]

A Figura 3 ilustra o funcionamento do processo de otimização da colônia de formigas descrito anteriormente. É possível observar que as formigas saem do ninho (N) em busca de comida (C) e, ao encontrá-la, retornam para o ninho espalhando feromônios pelo caminho. A primeira parte da imagem mostra como as primeiras formigas escolhem caminhos aleatórios nos primeiros momentos, mas com o passar do tempo os caminhos mais

curtos vão concentrando mais feromônios e atraindo mais formigas [55]. Como resultado, os caminhos menores vão recebendo cada vez mais reforço, enquanto os feromônios nos caminhos maiores vão evaporando, como pode ser visto na terceira e última parte da imagem.

Sendo assim, é possível aproximar uma heurística e representá-la matematicamente. A equação segue a lógica de calcular, em um tempo  $t$ , a probabilidade de transição do ponto  $i$  ao ponto  $j$  de uma formiga  $f$ , conforme descrito pela Equação 2.2. Essa representação matemática permite a utilização do algoritmo ACO para resolver problemas de otimização [56] e tem sido aplicada com sucesso em diversas áreas, como engenharia, economia, logística e robótica [58].

$$p_{ij}^f(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in N_i^f} [\tau_{ik}(t)]^\alpha [\eta_{ik}]^\beta} \quad (2.2)$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$$

onde,

- $\tau_{ij}(t)$  é a quantidade de feromônio na transição  $(i, j)$
- $\eta_{ij}$  é a conveniência de transição entre os pontos  $i$  e  $j$
- $d_{ij}$  distância entre  $i$  e  $j$
- $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros que controlam a influência dos feromônios e da conveniência, respectivamente
- $N_i^f$  é o conjunto de vizinhança ainda não visitado por uma formiga  $f$ .

A quantidade de feromônio deixado pela formiga  $f$  na transição  $(i, j)$  é atualizado a cada passo de tempo conforme a Equação 2.3.

$$\tau_{ij}^f(t) = (1 - \sigma)\tau_{ij}^f(t - 1) + \sum_{m=1}^M \Delta\tau_{ij}^m(t) \quad (2.3)$$

onde,

- $\sigma$  é a taxa de evaporação do feromônio
- $\sum_{m=1}^M \Delta\tau_{ij}^m(t)$  representa o total de feromônio depositado no caminho  $(i, j)$  pelas  $M$  formigas que passaram por ali. O depósito de feromônio é descrito pela Equação 2.4.

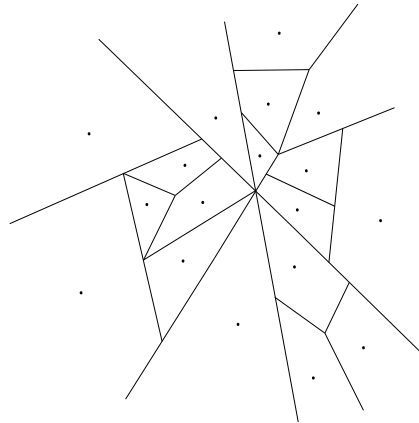
$$\tau_{ij} = \frac{Q}{d_f} \quad (2.4)$$

onde  $Q$  é uma constante que indica a quantidade total de feromônio que cada formiga deposita e  $d_f$  é a distância total percorrida pela formiga  $f$ .

### 2.3 DIAGRAMA DE VORONOI

O diagrama de Voronoi é uma ferramenta importante na geometria computacional que é utilizada para decompor o espaço em regiões [59]. A ideia por trás desse diagrama é criar sítios (regiões), também conhecidos como células de Voronoi, de forma que a distância entre um elemento  $e$  e um dado sítio  $s$  é menor quando comparada com a distância entre  $e$  e outros sítios [60]. O diagrama de Voronoi é amplamente utilizado em diferentes áreas da ciência da computação, como na descoberta de padrões [61]. A Figura 4 ilustra uma representação das regiões criadas em um espaço bidimensional.

Figura 4 – Exemplo de um diagrama de Voronoi



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Considere  $\mathbf{X}$  um espaço particionado por  $\mathbf{K}$  regiões, onde as distâncias podem ser medidas por uma função  $\mathbf{d}$ . A célula de Voronoi é denotada por  $R_k$  e o conjunto de pontos associado a essa célula é  $P_k$ , onde  $k \in K$ . As regiões de Voronoi pode ser descrita matematicamente pela equação 2.5. Segundo Preparata & Shamos [62], essa equação é baseada na definição de distância euclidiana entre dois pontos. A utilização dessa equação permite a criação de regiões precisas e eficientes, tornando, dessa forma, o diagrama de Voronoi uma ferramenta valiosa na área de geometria computacional.

$$R_k = \{x \in X \mid d(x, P_k) \leq d(x, P_j) \forall j \neq k\} \quad (2.5)$$

Existem algumas formas de representação do diagrama de Voronoi, conforme descrito por Aurenhammer [61]. Utilizando os atuais conceitos e poder de computação, a

representação do diagrama de Voronoi pode ser dada por algoritmos de agrupamento (ou clusterização), como *K-means* [63].

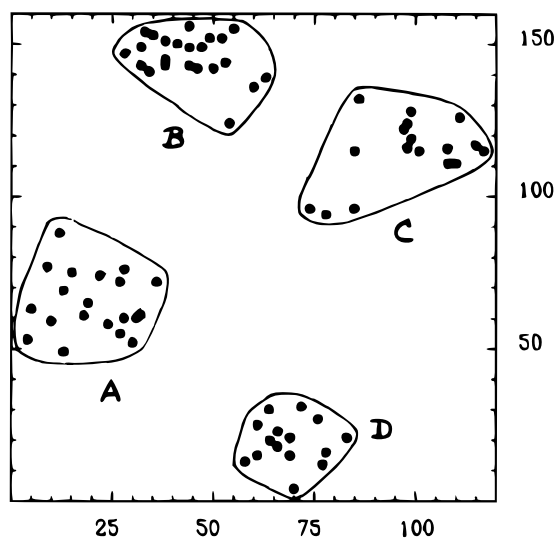
### 2.3.1 Agrupamento

É natural que em um conjunto de dados sejam encontrados grupos de informações com algum nível de similaridade entre si. No entanto, a descoberta desses grupos pode não ser óbvia e pode se tornar computacionalmente custosa, especialmente quando se trata de grandes volumes de dados. No campo da inteligência artificial, esse processo é construído e consolidado com algoritmos que buscam encontrar padrões nos dados utilizando o aprendizado de máquina.

Segundo Géron [47], o aprendizado de máquina é o processo de imitar e aprender comportamentos com os dados, fornecendo às máquinas a capacidade de aprender sem serem explicitamente programadas para isso. Comportamentos que podem ter origem desconhecida, mas podem ser identificados através de diferentes processos de análise. O aprendizado de máquina é uma ferramenta valiosa na busca de respostas para problemas.

Existem duas grandes áreas no aprendizado de máquina: o aprendizado supervisionado, onde há uma variável explícita a ser respondida, e o aprendizado não supervisionado, onde o objetivo é identificar grupos com similaridade. O agrupamento é, portanto, um tipo de aprendizado de máquina não supervisionado [64] e tem como objetivo analisar os dados de entrada para encontrar padrões de frequência de ocorrência [65]. Um exemplo destacado por Géron [47] é o de agrupar dados de um visitante de um *blog* através de perfis semelhantes.

Figura 5 – Exemplo de agrupamento em 4 grupos



Fonte: Adaptado de Rousseeuw [66].

A Figura 5 demonstra um exemplo de clusterização realizado em um conjunto de dados. É possível notar que as informações estão dispostas no espaço e com a utilização de 4 grupos, os dados mais próximos entre si são agrupados.

### 2.3.1.1 *K-means*

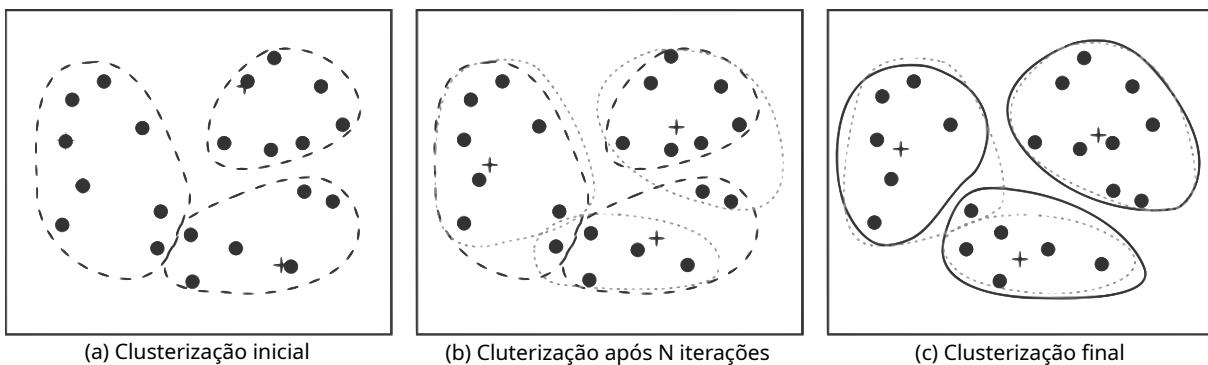
O algoritmo *K-means* é um dos métodos utilizados para realizar agrupamento em um conjunto de dados. Ele é um método randômico que necessita que a quantidade de grupos (ou *clusters*) seja definida previamente [67]. Descrito por Rokach & Maimon [68], o *K-means* é um método inicializado com um conjunto de dados  $\mathbf{X}$  e um número  $K$  de *clusters*, onde o centroide de cada grupo é definido, inicialmente, de forma aleatória ou de acordo com alguma heurística. A cada iteração, cada instância é atribuída ao *cluster* com centroide mais próximo. O centroide de cada grupo é recalculado a cada iteração de acordo com a média de todas as observações pertencentes ao *cluster* em questão, conforme a Equação 2.6.

$$\mu_k = \frac{1}{N_k} \sum_{q=1}^{N_k} x_q \quad (2.6)$$

onde  $N_k$  representa o número de instâncias pertencentes ao *cluster*  $k$  e  $\mu_k$  a média dos dados presentes no *cluster*  $k$ .

A Figura 6 ilustra um exemplo do processo de clusterização usando o algoritmo *K-means*. É possível observar as principais etapas do algoritmo, desde a disposição inicial dos dados até o resultado final. Na imagem, é possível ver a demarcação dos centroides dos clusters através do símbolo "+". É possível observar que esses centroides mudam de posição conforme ocorrem as iterações do algoritmo de clusterização.

Figura 6 – Processo de clusterização usando *K-means* com  $K = 3$ , onde (a) representa o estágio inicial dos dados, (b) estado após  $N$  iterações do método buscando os centroides e (c) os *clusters* obtidos ao final do processo.





## 2.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade (AS) tem como objetivo identificar os fatores que, ao sofrer pequenas variações, têm um maior impacto no resultado de um sistema [21, 69]. Seu principal objetivo é prever o efeito na saída de uma variável monitorada em um modelo em relação à variação de valores de outras variáveis deste mesmo modelo, possibilitando um processo de otimização onde pontos de baixa confiabilidade ou desempenho de um modelo possam aparecer na evolução do sistema [70].

Segundo Hamby [69], os modelos são sensíveis aos parâmetros fornecidos na entrada e são afetados de duas maneiras distintas:

- Pela variabilidade, ou incerteza, do parâmetro de entrada, o qual pode afetar a variabilidade de saída total. Quando a variação deste parâmetro altera significativamente o resultado do modelo, diz-se que ele é sensível a este parâmetro.
- Pela possibilidade de haver uma elevada correlação entre o parâmetro de entrada e o modelo, de tal forma que pequenas mudanças no valor do parâmetro de entrada resultem em significativas alterações na saída.

A análise de sensibilidade é importante para o modelo, pois com ela é possível compreender como o modelo completo depende dos valores fornecidos como entrada [21]. Ela é cada vez mais requisitada na modelagem para comprovar, garantir e validar as análises realizadas para a solução de um problema. Na indústria, por exemplo, a análise de sensibilidade vem sendo usada para realizar estimativas e estratégias mais robustas para a gestão de negócios, uma vez que os problemas empresariais podem ser modelados baseados em grandes quantidades de dados coletados [71].

Existem diferentes técnicas para tratar a sensibilidade dos parâmetros, a depender do tipo de análise desejada, das quais podemos citar as mais populares como Desenho de Experimentos (*Design of Experiments* - DoE), Análise de Correlação e Análise de Regressão [72]. Ao aplicar algum método, um valor de sensibilidade é obtido através do resultado observado na saída do modelo, com relação à variação dos parâmetros utilizados. A técnica DoE é amplamente utilizada para identificar as interações entre os parâmetros e sua influência nos resultados do modelo, enquanto a Análise de Correlação é utilizada para identificar a relação linear entre os parâmetros e os resultados, e a Análise de Regressão é utilizada para prever os resultados do modelo a partir das variações dos parâmetros, levando em consideração uma relação linear ou não linear [73].

### 2.4.1 Monte Carlo

O método de Monte Carlo (MMC) se baseia em avaliar o resultado de um problema quando algum parâmetro de entrada é variado, de forma aleatória, repetidas vezes [74].

A geração de amostras desses parâmetros é extraído de uma função de densidade de probabilidade (PDF) e geralmente é definido conforme a Equação 2.7

$$\{\mathbf{X}_{(r)}\}_{r=1}^R \quad (2.7)$$

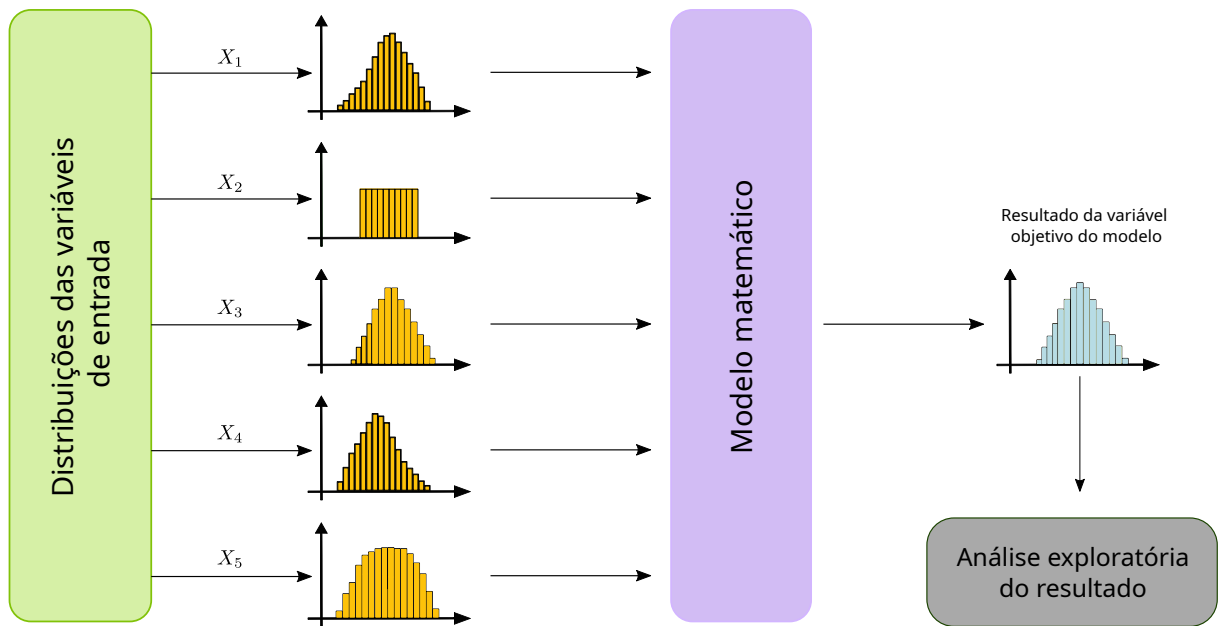
onde  $R$  é a quantidade de amostras geradas.

De acordo com Saltelli, Chan & Scott [74], o algoritmo que define o método de Monte Carlo pode ser visto de acordo com os seguintes passos:

1. Definir um domínio de possíveis valores para as variáveis a serem analisadas;
2. Gerar entradas aleatoriamente por uma distribuição de probabilidades sobre o domínio;
3. Executar os cálculos para encontrar o valor da variável objetivo da saída do modelo;
4. Agregar e avaliar os resultados.

A Figura 7 demonstra o processo do Monte Carlo do início ao fim. Dado um conjunto de entrada, através das variáveis  $X_{(r)}$ , o modelo matemático evolui e avalia o impacto dessas informações, gerando, ao fim, o resultado alcançado pela configuração de entrada à variável objetivo. Os resultados gerados podem ser avaliados com uma análise exploratória e a sensibilidade do modelo às variáveis de entrada, bem como a otimização dos parâmetros, podem ser extraídas. Dessa forma, o método de Monte Carlo pode ser utilizado no contexto de análise de sensibilidade e estimativa de incertezas [75].

Figura 7 – Processo de análise de sensibilidade usando o método de Monte Carlo, onde as variáveis de interesse em modificar os valores de entrada são obtidos por uma distribuição de probabilidades e são submetidas ao modelo matemático. O resultado da variável objetivo é avaliado com a configuração de entrada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).



### 3 MODELO E EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Modelos computacionais são utilizados frequentemente como uma ferramenta que auxilia no desenvolvimento das mais diferentes áreas do conhecimento. Como não poderia ser diferente, este mecanismo também auxilia na representação dos problemas de natureza das ciências econômicas [15]. Com o avanço da computação, vários trabalhos surgem com uma proposta matemática e com a resolução construída computacionalmente [17, 30].

Este capítulo se dedica a descrever detalhadamente a modelagem computacional de um sistema financeiro composto por uma estrutura industrial e bancária, de forma que estas entidades interajam entre si. É demonstrado como as diferentes entidades evoluem com o tempo e como as decisões tomadas podem impactar o sistema financeiro proposto de forma geral.

Para descrever as interações propostas, utilizou-se das ferramentas dispostas no Capítulo 2. O modelo, em sua forma mais básica, é regido por múltiplas equações matemáticas, as quais podem representar diferentes estados para em cada elemento do sistema. Além disso, os métodos mais robustos inseridos no capítulo anterior também são inseridos no sistema para auxiliar na tomada de decisão dos agentes.

Este capítulo também descreve os experimentos computacionais realizados a partir da modelagem colocada, abordando diferentes cenários em forma de experimentos que esperam comprovar computacionalmente os objetivos inicialmente propostos.

#### 3.1 PROPOSTA DO MODELO

Dentre os vários MBAs disponíveis na literatura optou-se pelo modelo proposto por De Paula [25, 17] dado o seu nível de simplificação permitindo, portanto, a inserção de métodos de inteligência artificial de forma mais objetiva e a análise das implicações desta inserção de forma isolada. Além disso, o autor argumenta que a forma de determinação da demanda das firmas proposta dá lugar à incerteza em seu sentido forte, ou seja, pode variar significativamente ao longo do tempo e é difícil de ser prevista com precisão com probabilidades. Isso é importante porque muitos modelos econômicos assumem que a demanda das empresas é conhecida e estável, o que pode não refletir a realidade. O objetivo do referido modelo é analisar o comportamento agregado de interações entre agentes heterogêneos em um sistema econômico, com ênfase na estabilidade financeira. Os agentes tomam decisões de forma descentralizada e sem influência direta das decisões uns dos outros, sujeitos às incertezas do meio. Além disso, o modelo conta com a interação de cinco tipos de agentes, sendo três ativos e dois passivos, com características e atribuições distintas, mas que interagem entre si para que o sistema evolua com o tempo.

A implementação dos agentes no modelo segue uma simulação baseada em agentes

e adiciona-se um acoplamento entre aprendizado por reforço, conceitos de otimização baseada em colônia de formiga e modelos não supervisionados de aprendizado de máquina, especificamente o uso do algoritmo *K-means*. Esse acoplamento é desenvolvido como uma heurística para simular entrada de novas firmas no sistema financeiro.

A unificação de todos esses modelos que foram citados acima é o que compõe a heurística aplicada à tomada de decisão do Sistema Bancário aplicado ao modelo descrito por De Paula [25]. Conforme já mencionado no início do trabalho, espera-se verificar se essa composição de métodos podem gerar uma melhoria para o sistema financeiro de forma agregada.

A Seção 3.2 está dividida em duas principais partes. A primeira parte (**Seção 3.2.2**) apresenta e detalha o modelo base proposto por De Paula [25]. A segunda parte (**Seção 3.2.3**) aborda como os algoritmos de inteligência são utilizados para compor a heurística que integra o modelo inicial em questão.

## 3.2 MODELO MATEMÁTICO

O modelo consiste em cinco tipos de agentes que interagem entre si e evoluem de forma distinta ao longo do tempo, formando um sistema financeiro. Destes, três são agentes ativos, ou seja, têm o poder de evoluir e alterar o sistema financeiro, enquanto os outros dois são agentes passivos, que não desempenham um papel ativo no modelo e não fazem alterações diretas no ambiente. No modelo matemático, estes são os únicos agentes explicitamente representados. Os tipos de agentes ativos presentes neste modelo são:

- **Tecnologia:** Este tipo de agente apresenta um conjunto de parâmetros que definem uma tecnologia específica. Essas tecnologias são projetos que podem se tornar novas firmas ao longo das interações do sistema;
- **Firma:** As firmas são agentes que evoluem ao longo do tempo e se adaptam ao ambiente. Elas interagem com o sistema financeiro para obter empréstimos para financiar a produção. Para isso, as firmas fazem solicitações ao banco, o próximo tipo de agente descrito. O desempenho da firma no mercado é determinante para avaliar o seu regime financeiro;
- **Sistema Bancário:** Este agente desempenha um papel crucial no sistema financeiro, fornecendo financiamento para as firmas através de empréstimos. Os bancos avaliam as solicitações de empréstimos das firmas e toma decisões sobre o fornecimento ou não de financiamento, baseado no capital disponível para isso. Além disso, os bancos monitoram as tecnologias que podem incorporar as firmas a cada período de tempo.

Os outros dois agentes do sistema não aparecem diretamente na modelagem dos agentes, pois estão intrinsecamente presentes de diferentes formas no sistema financeiro em questão. Os agentes passivos neste modelo são:

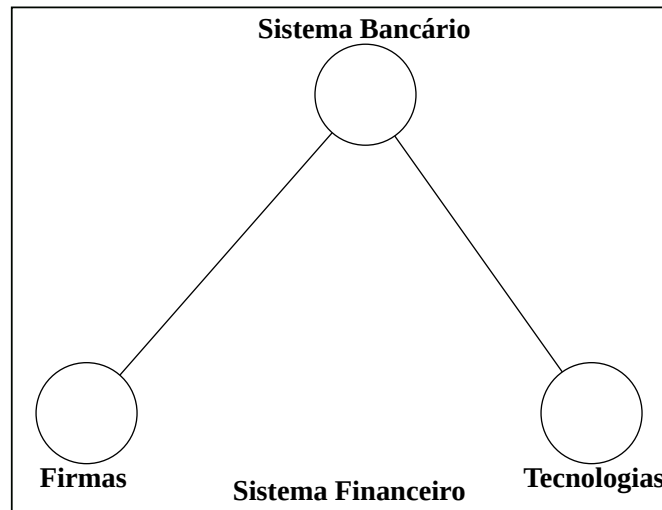
- **Governo:** Este agente é responsável por controlar a taxa de juros do sistema, emitir títulos públicos e recolher impostos. No entanto, no modelo em questão, o governo mantém a taxa de juros fixa e os impostos recolhidos servem apenas para pagar o rendimento dos títulos públicos. Portanto, o governo é considerado um agente passivo no sistema. Vale salientar que este agente também poderia ser responsável por implementar políticas fiscais e monetárias que afetam a economia;
- **Famílias:** As famílias são agentes que fornecem mão de obra para as firmas e, ao mesmo tempo, são consumidoras dos produtos oferecidos por elas. Assim, o valor da mão de obra das famílias é considerado como uma parte da demanda total pelos produtos oferecidos pelas firmas. No entanto, as famílias não têm poder de escolha dentro da dinâmica do sistema, portanto, são consideradas como agentes passivos.

Ao invés de tentar representar toda a complexidade de um sistema financeiro real, o modelo em questão faz uma simplificação, considerando apenas um grande banco para representar todo o sistema bancário. Por conta disso, o agente Sistema Bancário por vezes é tratado simplesmente como Banco neste trabalho.

A Figura 8 representa um esquema de como as interações acontecem no sistema. O Sistema Bancário, representado por um único grande banco, seleciona uma quantidade  $n$  de tecnologias para associar a diferentes firmas no período inicial e concede financiamento a elas. A cada iteração de tempo, o Banco seleciona uma nova Tecnologia (projeto) para associar a uma nova Firma, mas essa seleção é aleatória e não baseia-se em nenhum tipo de inteligência. A cada tempo, as firmas produzem uma quantidade de produtos e, para isso, verificam a possibilidade de arcar com os custos de produção, verificando se há fundos internos disponíveis. Caso contrário, as firmas solicitam um empréstimo ao banco para arcar com esses custos, com uma taxa de juros  $r$ .

Seguindo a taxonomia proposta por Minsky [76], as firmas que conseguem pagar suas dívidas estão sob o regime financeiro Hedge. As Firmas que não conseguem pagar as dívidas com o banco podem estar em dois regimes financeiros distintos: o Especulativo, onde conseguem pagar apenas os juros da dívida, ou o regime Ponzi, onde não conseguem arcar nem mesmo com os juros decorrentes dos empréstimos realizados. Nessa última, as firmas têm uma alta probabilidade de serem excluídas do sistema financeiro.

Figura 8 – Esquema do modelo de sistema financeiro através dos diferentes tipos de agentes ativos



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 3.2.1 Fluxograma de informações

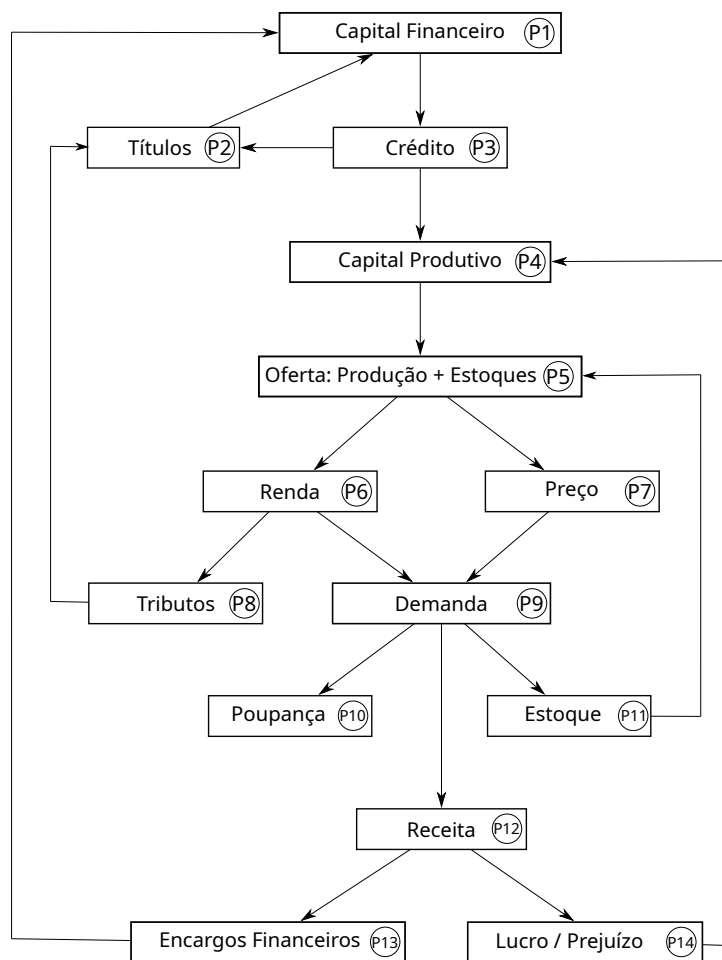
Uma vez definida a estrutura geral do modelo, pontuando e conceituando os agentes que o compõem, passa a ser possível definir um fluxograma do funcionamento do modelo. Conforme definido por De Paula [25], a Figura 9 demonstra esquematicamente as interações presentes no modelo.

A seguir, os passos inerentes à Figura 9 serão discutidos, alinhado com o exposto por De Paula [25] onde cada etapa pode ser identificada na imagem com o prefixo *P*. Dado que o modelo restringe o sistema financeiro a um único banco, todo o capital financeiro será associado a esse banco (*P1*). De posse desse recurso, o banco passará a oferecer crédito para as firmas que o solicitarem (*P3*). Porém, é necessário descontar desse total o valor mínimo de aplicação em títulos definido pelo banco (*P2*), os quais rendem a uma taxa básica de juros definida exogenamente. Os bancos são induzidos à aplicações em títulos, pois têm preferência por liquidez. Entretanto, em momentos de alta do *spread* bancário, o rendimento esperado nos financiamentos se mostra maior, estimulando o banco a alocar um recurso maior para os financiamentos das firmas.

O volume de crédito concedido pelo banco passará pela determinação de uma expectativa de demanda do lado das firmas, as quais são criadas pela observação histórica dessa mesma variável, considerando um sistema com algum nível de incerteza, como é o caso deste trabalho. Definido as expectativas de demanda, o banco concederá crédito de acordo com a sua reserva destinada para tal fim, podendo ser desde uma oferta infinitamente elástica até uma oferta com racionamento de crédito entre as firmas. Após destinar os valores de crédito as firma, caso algum valor ainda seja remanescente, o banco realiza aplicação em títulos (*P2*).



Figura 9 – Fluxo de trabalho do modelo



Fonte: Adaptado de De Paula [25].

Tomando esse crédito, as firmas passam a ter um capital produtivo (P4), com o qual realizam a definição da oferta de produtos (P5) considerando um volume de mão-de-obra e o seu custo fixo. A partir daí, as empresas definem os preços a serem praticados a partir de uma abordagem minskiana [76], considerando uma abordagem que leva em conta o *markup*, a quantidade de produtos efetivamente produzidos e suas dívidas e lucros. As firmas também definem sua renda agregada através dos lucros obtidos em sua produção (P6). Além da renda gerar tributos (P6) que incorporam os títulos públicos (P2), a renda em conjunto com os preços definem a demanda de produção, das quais é possível extrair a receita em função da produção (P12), eventuais estoques (P11) caso todo o estoque não seja consumido e a poupança, caso haja, por simplificação do modelo, alguma renda não gasta no processo. Esses três fatores são chave para a definição do regime financeiro que a firma se encontra naquele momento e será utilizado pelo banco para realizar concessão de crédito no período de tempo seguinte.

A partir da receita, as firmas conseguem pagar seus encargos financeiros (P13), que são basicamente pagamento de amortização e de juros do empréstimo tomado junto ao

banco, e conseguem estimar seus lucros ou prejuízos (P14). Uma vez que o banco recebe os encargos dessas firmas, esse montante volta como capital financeiro do banco (P1). O lucro ou prejuízo da firma no atual período de tempo, impacta no seu capital produtivo (P4).

A política econômica considerada no modelo é a de que o banco mantém a taxa básica de juros fixa. Como não há um agente referente ao governo explicitamente definido aqui, essa abstração pode ser realizada sem maiores problemas, assumindo um equilíbrio fiscal permanente durante toda a execução do modelo.

Por motivos de simplificação do modelo, as firmas deverão amortizar suas dívidas integralmente em cada período de tempo. Se o caixa das firmas for insuficiente para cobrir a amortização, elas pagarão apenas os juros sobre a dívida ao banco.

Quanto ao crédito concedido às firmas, o valor total disponibilizado é originado pela demanda das firmas inseridas no modelo. No entanto, como o banco está predisposto a conceder crédito neste modelo, ele permitirá que novas firmas sejam incorporadas ao sistema financeiro a cada período de tempo. Para tal, um agente do tipo tecnologia fará uma “proposta” ao banco para que avalie a concessão de crédito. Se aprovada, à grosso modo, esse agente de tecnologia se torna uma firma.

### 3.2.2 Modelo base

Este trabalho é dividido em duas partes: a primeira é o modelo base, que segue a construção exposta no trabalho de referência [25], e a segunda é a incorporação da heurística mencionada, que combina os métodos de aprendizado por reforço, colônia de formigas e diagrama de Voronoi. Esta Seção dedica-se à apresentar o modelo base.

#### 3.2.2.1 Definições do agente tecnologia

Como mencionado, a Tecnologia é composta por 3 parâmetros, os quais são definidos da seguinte maneira:

$$A_j = \text{norm}(A_{coef}, \Lambda) \quad (3.1)$$

$$T_j = \text{norm}(T_{coef}, \Lambda) \quad (3.2)$$

$$F_j = \text{norm}(F_{coef}, \Lambda) \quad (3.3)$$

onde  $A$  é a tecnologia do produto,  $T$  é a tecnologia do processo e  $F$  o custo fixo associado. Cada um destes parâmetros são definidos com uma função normal centrada em coeficientes pré-determinados e com desvio padrão  $\Lambda$ , o qual define a assimetria dos dados.

### 3.2.2.2 Definições do agente firma: demanda por financiamento

Cada firma  $i$  calcula a quantidade total de produtos ofertados através da função de produção, que é baseada na sua estrutura tecnológica. Note que a quantidade  $Q$  se refere à produção ofertada pelas firmas. A função de produção é expressa pela Equação 3.4.

$$Q_i^t = T_i(L_i^t - F_i) + V_i^t \quad (3.4)$$

onde  $L$  é a quantidade de insumos utilizados e  $V$  são os estoques que podem existir da última iteração do sistema. Para este trabalho, os insumos  $L$  considerados são apenas a quantidade de mão de obra necessária.

Para encontrar a quantidade de insumo  $L$  que cada firma  $i$  necessita em cada tempo  $t$ , pode-se remanejar a função de produção definida na Equação 3.4, desconsiderando os estoques possivelmente existentes. No entanto, é preciso substituir a quantidade de produtos ofertados (que ainda não é possível calcular) pela quantidade de produtos que a firma espera produzir em cada ciclo. Essa quantidade é conhecida como expectativa de demanda ( $E_d$ ) e é baseada no histórico de produção da firma em tempos anteriores, utilizando regras definidas pela Tabela 1.

Tabela 1 – Regras decisórias utilizadas para o cálculo da expectativa de demanda.

Regra	Ação
1	Média aritmética simples dos últimos 10 períodos
2	Máximo valor observado nos últimos 10 períodos
3	Mínimo valor observado nos últimos 10 períodos
4	Mediana dos últimos 10 períodos
5	Valor observado no período imediatamente anterior
6	Média aritmética simples dos últimos 5 períodos
7	Máximo valor observado nos últimos 5 períodos
8	Mínimo valor observado nos últimos 5 períodos

Fonte: Adaptado de De Paula [25].

Pode-se controlar como as regras definidas na Tabela 1 são usadas no modelo. Dessa forma, pode-se escolher entre uma expectativa homogênea, onde cada firma  $i$  seguirá uma regra determinada desde o início até o final do processo, ou uma expectativa heterogênea, onde a cada tempo uma nova regra pode ser utilizada. Além disso, pode-se controlar se essas regras serão escolhidas de forma previamente definida ou de forma aleatória.

Portanto, a quantidade de produção esperada, baseado a expectativa de demanda, pode ser calculado utilizando a Equação 3.5.

$$Q_{d_i}^t = \begin{cases} E_{d_i}^t - V_i^{t-1}, & \text{se } E_{d_i}^t > V_i^{t-1} \\ 0, & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.5)$$

Por sua vez, a quantidade de insumo utilizado  $L$ , pode ser calculado conforme a Equação 3.6.

$$L_i^t = \frac{Q_{d_i}^t + T_i F_i}{T_i} \quad (3.6)$$

É importante destacar que o custo fixo  $F$  representa a quantidade mínima de insumos, nesse caso, a mão de obra, necessária para que a tecnologia utilizada pela firma seja iniciada [77]. Se o custo fixo  $F_i$  for maior que a quantidade de insumos  $L_i^t$ , a firma em questão não poderá utilizar a tecnologia e, conseqüentemente, será excluída do sistema financeiro.

Após a determinação da quantidade de produção desejada ( $Q_d$ ) por cada firma, é fundamental verificar se há capital suficiente para que a produção possa ser executada. Neste modelo, o único custo considerado é o relativo a mão de obra. Portanto, é necessário estabelecer o custo associado a essa mão de obra, o qual é definido na Equação 3.7.

$$W_{L_i}^t = W L_i^t \quad (3.7)$$

onde  $W$  é uma taxa fixa de salário, considerando-se uma oferta de trabalho infinitamente elástica<sup>6</sup>.

Definidos os gastos das firmas, é necessário que elas verifiquem se existem fundos internos associados a lucros acumulados de iterações passadas ( $A_P$ ) e se estes cobrem os custos. Caso não existam tais fundos ou sejam insuficientes, as firmas irão demandar financiamento bancário ( $K_L$ ). Essa demanda será verificada a cada período de tempo  $t$ , onde três cenários podem acontecer. São eles:

- (i) O volume dos estoques ( $V$ ) é inferior à demanda desejada ( $Q_d$ ) e os lucros acumulados ( $A_P$ ) são insuficientes para cobrir os custos de produção;
- (ii) A demanda desejada ( $Q_d$ ) é maior que o volume de estoques ( $V$ ), mas os lucros acumulados ( $A_P$ ) são suficientes para realizar a produção desejada;
- (iii) A expectativa de demanda é menor ou igual aos estoques acumulados.

Cada firma  $i$  realiza a sua demanda por financiamento ( $K_L$ ) em todos os períodos  $i$ . Os 3 cenários estipulados acima podem ser resumidos conforme a equação a seguir:

$$K_{L_i}^t = \begin{cases} W_{L_i}^t - A_{P_i}^{t-1}, & \text{se } Q_d^{i,t} > V^{i,t} \text{ e } A_{P_i}^{t-1} < W_{L_i}^t \\ 0, & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.8)$$

Essa demanda por financiamento é o que cada firma precisa para manter a plena operação. A demanda é entregue ao banco para realizar a concessão. Porém, o banco pode

<sup>6</sup> Isso significa que, independentemente do quanto o salário aumente ou diminua, a quantidade de trabalho disponível permanecerá a mesma [1].

não dispor de todo o recurso necessário para cobrir o total de financiamento demandado pelas firmas. Portanto, antes de realizar a concessão, o banco precisa verificar quanto crédito ele poderá conceder às firmas. A Equação 3.9 demonstra o total da demanda por crédito realizada pelas firmas.

$$K_{L_{total}}^t = \sum_i^{N_{firmas}} K_{L_i}^t \quad (3.9)$$

onde  $N_{firmas}$  representa o total de firmas no sistema. Cabe reforçar aqui que o sistema financeiro nessa modelagem é composto por um único grande banco.

### 3.2.2.3 Definições do agente banco: aplicação e financiamento

Do montante solicitado pelas firmas, verificado pela Equação 3.9, o banco verificará o quanto pode ser atendido. Para isso, verifica se esse valor está compreendido em seu capital através do valor de  $K_{bank}$ . Porém, o banco faz um remanejamento de seu capital a cada passo de tempo  $i$ , separando uma parte do dinheiro para aplicações em títulos públicos ( $K_{tit}$ ) e a outra parte fica disponível para os financiamentos. Essas definições são realizadas pelas Equação 3.10 e Equação 3.11.

$$K_{tit}^t = \zeta^{t-1} K_{bank}^{t-1} \quad (3.10)$$

$$K_{bank}^t = K_{bank}^{t-1} - K_{tit}^t \quad (3.11)$$

onde  $\zeta^{t-1}$  representa a taxa de aplicação em títulos públicos calculada no passo de tempo  $t - 1$ . A dinâmica de atualização dessa informação é demonstrada mais à frente. A atualização dessa informação no passo de tempo atual é dada pela Equação 3.12.

$$\zeta^t = K_{tit^\ominus}^t \left( \frac{K_{tit^\oplus}^t}{K_{tit^\ominus}^t} \right)^{s_p^t} \quad (3.12)$$

sendo  $K_{tit^\ominus}^t$  e  $K_{tit^\oplus}^t$  parâmetros que definem o montante mínimo e máximo de aplicação em títulos públicos pelo banco, respectivamente.

Definido o valor disponível para investimentos pelo banco no período de tempo  $t$ , é necessário verificar se o seu capital  $K_{bank}$  cobre os custos dos financiamentos solicitados na Equação 3.9. Caso o capital não seja suficiente para arcar com todos os empréstimos solicitados, o banco adota uma política de ajustar a oferta de crédito, reduzindo o valor solicitado por uma taxa  $a_j$  constante para todas as firmas, conforme a Equação 3.13, realizando, assim, um racionamento de crédito.

$$a_J = \begin{cases} \frac{K_{L_{total}}^t}{K_{bank}^t}, & \text{se } K_{L_{total}}^t > K_{bank}^t \\ 1, & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.13)$$

Cabe observar que quando não há necessidade de racionamento de crédito, ou seja,  $a_J = 1$ , pode acontecer a situação onde o seu capital ( $K_{bank}$ ) seja maior do que a

quantidade total de crédito demandada ( $K_{L_{total}}$ ). Nesses casos, a diferença de valor é somada à quantidade de crédito investido em títulos públicos ( $K_{tit}$ ).

#### 3.2.2.4 Definições do agente firma: produção e preço

Definido o possível ajuste no total de crédito concedido às firmas, é necessário aplicar esse ajuste, do lado das firmas, na demanda de crédito da Equação 3.8. A Equação 3.14 demonstra essa atualização.

$$K_{L_i}^t = K_{L_i}^t a_J^t \quad (3.14)$$

Sabendo o real valor que conseguirá tomar de créditos, as firmas fazem a sua separação de capital disponível para produção, seguindo os mesmos cenários construídos para a Equação 3.8.

$$K_i^t = \begin{cases} K_{i,t}^L + A_{i,t}^P, & \text{se } Q_{d_i}^t > V_i^{i,t} \text{ e } A_{P_i}^{t-1} < W_{L_i}^t \\ A_{i,t}^P, & \text{se } Q_{d_i}^t > V_i^t \text{ e } A_{P_i}^{t-1} \geq W_{L_i}^t \\ 0, & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.15)$$

Uma vez definido o capital disponível para investimento por parte das firmas, este modelo adota uma estratégia de converter os investimentos em produção. Dessa forma, o valor de  $K$  é utilizado para atualizar os insumos disponíveis para realização da produção, conforme a Equação 3.16.

$$L_i^t = \frac{K_i^t}{W^t} \quad (3.16)$$

Apesar de ter uma demanda de produção desejada, conforme a Equação 3.5, as firmas podem não conseguir produzir toda essa quantidade. A capacidade de produção efetiva é definida da mesma forma que a função de produção da firma, definida na Equação 3.4, porém, os insumos utilizados são aqueles encontrados pela Equação 3.16. Portanto, a quantidade de produção efetiva é dada por:

$$Q_{s_i}^t = T_i(L_i^t - F_i) + V_i^{t-1} \quad (3.17)$$

Além da atualização de  $L$ , o capital disponível para investimentos ( $K$ ) permite o cálculo da renda agregada. Uma vez que  $L$  é definido pela Equação 3.16, o valor de  $K$  passa a ser equivalente a  $W^t L_i^t$ , o que representa a massa salarial da firma  $i$ . Esse valor, de cada firma, somado à poupança (quando houver) das firmas ( $S$ ), define a renda agregada ( $Y^t$ ), conforme a Equação 3.18.

$$Y^t = \sum_i^{N_{firmas}} K_i^t + S_i^t \quad (3.18)$$

Para fins de simplificação do modelo, considera-se aqui que a poupança significa uma “renda não gasta”, admitindo que toda renda é disponibilizada para realizar o consumo. Nesse caso, essa renda não gasta ( $S$ ) fica disponível no período de tempo seguinte.

Com as informações acima calculadas, as firmas conseguem estimar seus lucros ( $A_P^t$ ), o saldo devedor junto ao banco ( $S_d^t$ ) e atualizar sua dívida total (incluindo a incidência de juros sobre a dívida) com o banco ( $A_{D_i}^t$ ). Os valores são demonstrados pelas equações 3.19, 3.20 e 3.21, respectivamente.

$$A_{P_i}^t = \begin{cases} A_{P_i}^{t-1} - W_{L_i}^t, & \text{se } A_{P_i}^{t-1} \geq W_{L_i}^t \\ 0, & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.19)$$

$$S_{d_i}^t = S_{d_i}^{t-1} + K_{L_i}^t \quad (3.20)$$

$$A_{D_i}^t = A_{D_i}^{t-1} + K_{L_i}^t \quad (3.21)$$

Em seguida, as firmas definem o preço de venda de seus produtos seguindo uma definição de *markup* ( $M_k$ ), conforme definido pela Equação 3.22:

$$P_i^t = \frac{M_{k_i}^t [(A_{D_i}^{t-1} + K_{L_i}^t)(1 + r^t) + A_{P_i}^t]}{Q_{d_i}^t} \quad (3.22)$$

onde  $r$  é a taxa de juros de empréstimo definida pelo banco e  $M_k$  é o *markup*, que é calculado conforme a Equação 3.23 e significa, em linhas gerais, a diferença entre o preço de venda de um produto ou serviço e o seu custo de produção ou aquisição [78].

$$M_{k_i}^t = M_{k_i}^{t-1} \cdot \left( 1.0 + \gamma \cdot \frac{Q_{d_i}^t \cdot Q_{s_i}^t}{Q_{s_i}^t} \right) \quad (3.23)$$

onde  $\gamma$  é uma constante que diz sobre a sensibilidade e variação do *markup*.

### 3.2.2.5 Definições do agente firma: competitividade e market share

A competitividade e o *market share* são conceitos amplamente estudados na literatura econômica. Silverberg, Dosi e Orsenigo [79] *apud* De Paula [17] propõem uma forma alternativa de determinação da demanda a partir da relação entre essas duas variáveis. A competitividade, observado pela Equação 3.24, pode ser definida como a capacidade da firma competir no mercado, sendo medido como a relação entre o preço praticado pela firma e a sua qualidade [80]. Já o *market share*, definido pela Equação 3.25, é a participação de mercado de uma determinada firma no mercado total de um produto ou serviço, sendo esta influenciada pelo valor da competitividade em relação à média ponderada do *market share*.

$$C_i^t = \frac{1.0}{P_i^t (M_i^{t-1})^{A_i}} \quad (3.24)$$

onde  $0 < M_i^t < 1$  e  $\sum_i^{N_{firmas}} M_i^t = 1$ .

$$M_i^t = M_i^{t-1} \cdot \left( 1.0 + \lambda \cdot \left( \frac{C_i^t}{\bar{C}^t} - 1.0 \right) \right) \quad (3.25)$$

onde  $\lambda$  é a taxa de ajustamento do *market share* e  $\bar{C}^t$  é a competitividade média ponderada pelo *market share* e é definido como

$$\bar{C}^t = \sum_i^{N_{firmas}} C_i^t M_i^{t-1} \quad (3.26)$$

Definido o *market share* das firmas, passa a ser possível definir a quantidade demandada pelas firmas, uma vez que esse valor é equivalente a proporção da renda agregada ( $Y_d^t$ ) e *market share* ponderado pelo preço praticado pela firma:

$$Q_{d_i}^t = \frac{M_i^t \cdot Y^t}{P_i^t} \quad (3.27)$$

### 3.2.2.6 Definições do agente firma: avaliação da oferta e demanda

Uma vez definido a demanda pelas firmas pela Equação 3.27 e toda a oferta através da Equação 3.17, é possível definir cenários de receita, poupança e estoques das firmas. Verificando se quantidade ofertada supri a quantidade demandada, pode-se construir as seguintes equações para receita, poupança e estoque, respectivamente:

$$R_i^t = \begin{cases} P_i^t Q_{d_i}^t, & \text{se } Q_{d_i}^t \leq Q_{s_i}^t \\ P_i^t Q_{s_i}^t, & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.28)$$

$$S_i^t = \begin{cases} S_i^{t-1}, & \text{se } Q_{d_i}^t \leq Q_{s_i}^t \\ P_i^t (Q_{d_i}^t - Q_{s_i}^t), & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.29)$$

$$V_i^t = \begin{cases} 0, & \text{se } Q_{d_i}^t \geq Q_{s_i}^t \\ Q_{s_i}^t - Q_{d_i}^t, & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.30)$$

Em relação às receitas, é possível calcular o montante total somando o valor de receita atual, determinado pela Equação 3.28, aos lucros acumulados pela firma provenientes do período anterior, conforme expressado pela Equação 3.31.

$$R_{T_i}^t = R_i^t + A_{P_i}^t \quad (3.31)$$

### 3.2.2.7 Definições do agente firma: regimes financeiros

Os regimes financeiros que as firmas podem assumir são classificados como Hedge, Especulativo e Ponzi. Cada um destes regimes tem características distintas e afetam diretamente a forma como a firma administra seu fluxo de caixa e sua estratégia de investimento.

Uma vez calculado o montante total de receita acumulado ( $R_T$ ) das firmas, é possível identificar qual regime financeiro está em vigor para cada uma delas. Esta



identificação é realizada de acordo com a Equação 3.32.

$$F_{R_i} = \begin{cases} 1, & \text{se } R_{T_i}^t \geq A_{D_i}^t(1 + z^{t-1}) \\ 2, & \text{se } z^{t-1}A_{D_i}^t \leq R_{T_i}^t < A_{D_i}^t(1 + z^{t-1}) \\ 3 & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.32)$$

Os rótulos da Equação 3.32 podem ser comparados à taxonomia proposta por Minsky [76]. O rótulo 1 corresponde a firmas do tipo Hedge, que possuem recursos suficientes para cobrir suas dívidas, sendo este o regime financeiro preferencial do ponto de vista do sistema. Já o rótulo 2 indica firmas sob o regime financeiro Especulativo, nas quais elas conseguem apenas pagar juros sobre suas dívidas, sem conseguir amortizar o valor principal. Por fim, o rótulo 3 indica firmas em regime financeiro Ponzi, as quais não conseguem cobrir nem mesmo os juros de suas dívidas. Esses dois últimos regimes são considerados tipos distintos de endividamento e emergem das diferentes formações de expectativas e das diferenças tecnológicas entre as firmas presentes no sistema financeiro [17].

Os juros e a amortização podem ser considerados como componentes distintos das dívidas das firmas. Ambos os valores são devidos pelas firmas aos bancos como resultado dos empréstimos obtidos ao longo do tempo. Formalmente, os juros e a amortização podem ser definidos pela Equação 3.33 e Equação 3.34, respectivamente.

$$J_i^t = \begin{cases} R_{T_i}^t, & \text{se } F_{R_i}^t = 3 \\ 0.0, & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.33)$$

$$A_{M_i}^t = \begin{cases} A_{D_i}^t, & \text{se } F_{R_i}^t = 1 \\ R_{T_i}^t - z^{t-1} \cdot A_{D_i}^t, & \text{se } F_{R_i}^t = 2 \\ 0.0 & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.34)$$

Vale destacar que o valor dos lucros acumulados pelas firmas ( $A_{P_i}^t$ ) já foi calculado pela Equação 3.19. No entanto, esse valor pode ser atualizado caso as firmas sejam do tipo Hedge e, mesmo após pagarem os juros e a amortização da dívida, ainda tenham algum lucro. Nesse caso, o novo valor de  $A_{P_i}^t$  é dado pela Equação 3.35.

$$A_{P_i}^t = \begin{cases} R_{T_i}^t - z^{t-1} \cdot A_{D_i}^t & \text{se } F_{R_i}^t = 1 \\ 0.0 & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.35)$$

Firmas endividadas, especialmente aquelas que seguem o regime Ponzi, experimentam efeitos negativos. Os preços, definidos pela Equação 3.22, são diretamente proporcionais ao valor da dívida das firmas e inversamente proporcionais à competitividade, de acordo com a Equação 3.24. Quando a situação se agrava, as firmas podem não mais cumprir o critério mínimo  $L_i^t \geq F_i^t$  (insumos maiores ou iguais ao custo fixo) para permanecer no sistema financeiro. Quando esse critério não é atendido, a firma é excluída

do mercado e o banco registra o prejuízo da dívida da firma em um montante de dívidas não pagas ( $K_{fail}$ ), formalmente descrito pela Equação 3.36.

$$K_{fail}^t = K_{fail}^{t-1} + \sum_i^{N_{firmas}} \beta S_d^t \quad (3.36)$$

onde  $\beta = 0$  se  $L_i^t \geq F_i^t$  e  $\beta = 1$  caso contrário. Ou seja, o valor de  $K_{fail}^t$  apenas aumenta se alguma firma não tiver o critério mínimo necessário para sobrevivência.

### 3.2.2.8 Definições do agente banco: financiamento à entrada e racionamento de crédito

A cada passo de tempo do modelo, o banco realiza a avaliação de suas receitas e despesas e considera a entrada de novas firmas no sistema financeiro. A entrada é realizada por meio de “projetos” de tecnologias disponibilizados pelo agente Tecnologia. O banco escolhe de forma aleatória uma tecnologia  $j$  e avalia as características que ela pode agregar à uma nova firma. Essa avaliação inclui a definição de uma estimativa de preço ( $P^*$ ) para a nova firma baseando-se nos parâmetros da tecnologia. O banco estabelece um preço limite ( $P_B$ ) com base nas firmas já presentes no sistema financeiro, para permitir a entrada de um projeto de firma.

Antes de determinar a estimativa de preço para o projeto, três valores são importantes de serem calculados e associados à firma no momento de sua entrada no sistema financeiro: o capital mínimo necessário para a operação do projeto ( $K^*$ ), a quantidade inicial de insumos requeridos ( $L^*$ ) e sua função de produção ( $Q^*$ ), conforme definidos nas Equações 3.37, 3.38 e 3.39, respectivamente.

$$K_j^* = \gamma F_j W \quad (3.37)$$

$$L_j^* = \frac{K_j^*}{W} \quad (3.38)$$

$$Q_j^* = T_j(L_j^* - F_j) \quad (3.39)$$

onde  $\gamma$  é um número aleatório com distribuição uniforme entre  $(1, \mu)$ .

Dado as definições acima, é possível calcular o preço esperado que a firma irá praticar (Equação 3.40), o qual definirá o nível de competitividade da firma em relação às firmas já presentes no sistema.

$$P_j^* = \frac{\eta K_j^* (1.0 + z^{t-1})}{Q_{s_j}^*} \quad (3.40)$$

onde  $\eta$  é um parâmetro referente ao *market share* que é atribuído às firmas que iniciam no tempo  $t = 0$  do sistema, assim como às firmas que se inserem no sistema ao longo do tempo em seu primeiro passo.

O banco só concederá o financiamento à nova firma solicitante se ela conseguir mostrar a capacidade de ser competitiva no sistema. Isso só será possível quando  $P_j^* < P_B^t$ .

O preço limite do banco para financiamento ( $P_B^t$ ) é definido pela Equação 3.41.

$$P_B^t = \frac{\bar{P}^t}{g^t} \quad (3.41)$$

onde  $\bar{P}^t$  é a média dos preços praticados pelas firmas no tempo  $t$ , e  $g$  representa o desvio padrão dos últimos 10 períodos do indicador de desempenho do ativo de crédito ( $K_{bank}$ ) em relação ao ativo de títulos públicos ( $K_{tit}$ ). Esse indicador é calculado por meio da Equação 3.42.

$$h^t = \frac{\sum_i^{N_{firmas}} J_i^t - K_{fail}^t}{K_{bank}^t} \cdot \frac{K_{tit}^t}{Y_g^t} \quad (3.42)$$

Formalmente, o desvio-padrão do indicador  $h$  é descrito pela Equação 3.43.

$$g^t = \sigma(h^t, h^{t-2}, \dots, h^{t-10}) \quad (3.43)$$

### 3.2.2.9 Definições do agente banco: determinação do spread bancário

Um dos aspectos principais considerados por esse modelo para avaliação de desempenho é o grau de fragilidade financeira percebida, que é utilizada, inclusive, como variável alvo. A fragilidade é determinada através da Equação 3.44. Quanto maior o seu valor, mais instável está o sistema financeiro. Quanto menor é o valor, mais estável está o sistema.

$$\varphi^t = \frac{(1 + z^{t-1}) \sum_i^{N_{firmas}} A_{D_i}^t - \sum_i^{N_{firmas}} (J_i^t + A_{M_i}^t)}{(1 + z^{t-1}) \sum_i^{N_{firmas}} A_{D_i}^t} \quad (3.44)$$

Note que o numerador da Equação 3.44 demonstra a diferença entre o total de pagamentos que a firma deveria realizar em relação ao que efetivamente foi quitado. Após a determinação da fragilidade pela Equação 3.44, é possível calcular o *spread* bancário como uma função do grau de fragilidade financeira percebida, conforme a Equação 3.45.

$$s_p^t = \alpha \cdot s_p^{t-1} + (1 - \alpha) \cdot \varphi^t \quad (3.45)$$

onde  $\alpha \in [0, 1]$  é um peso que controla a importância atribuída aos valores antigos do *spread* bancário ( $s_p^{t-1}$ ) e da fragilidade financeira ( $\varphi^t$ ). Se  $\alpha$  estiver próximo de 1, isso significa que o valor atual da fragilidade financeira será mais informativo do que o valor anterior do *spread* bancário. Se  $\alpha$  estiver próximo de 0, o inverso acontecerá.

Por fim, a taxa de juros é definido em função do *spread* bancário e a taxa básica de juros  $\iota$ , conforme Equação 3.46.

$$z^t = (1.0 + s_p^t)\iota \quad (3.46)$$

onde  $\iota$  é a taxa de juros do mercado.

A atualização dos recursos do banco é uma etapa importante que ocorre ao final de cada ciclo do modelo. Ela leva em conta os rendimentos obtidos a partir da aplicação em títulos públicos, bem como os pagamentos de dívidas realizados pelas empresas ao banco. Esse processo é representado pela Equação 3.47.

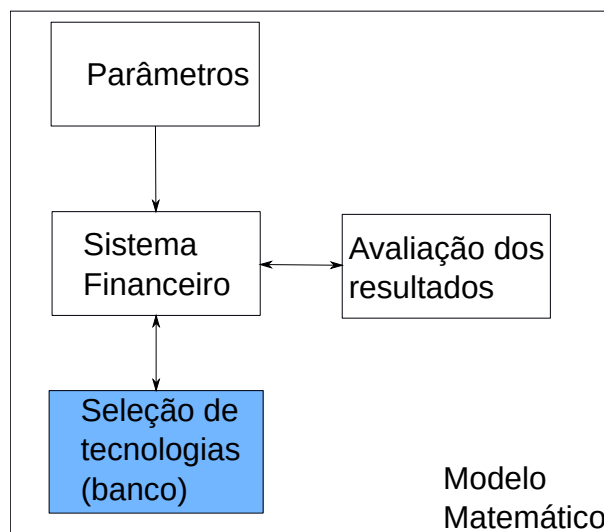
$$K_{bank}^t = K_{tit}^t(\iota + 1) + \sum_i^{N_{firmas}} (J_i^t + A_{M_i}^t) \quad (3.47)$$

O modelo irá evoluir com o tempo e as variáveis serão atualizadas em cada ciclo. A admissão de novas firmas no sistema será determinada, inicialmente, por um critério aleatório de seleção de tecnologias. Em seguida a entrada passa pela aprovação do banco, conforme descrito na *Seção 3.2.2.8*. No entanto, uma nova abordagem para essa admissão será apresentada posteriormente.

### 3.2.3 Heurística para entrada de novas firmas

Observando a natureza totalmente aleatória da escolha realizada pelo banco para a entrada de novas firmas no sistema, é possível notar que não há garantia de qual será o impacto dessa nova firma sobre o sistema financeiro como um todo. Desta forma, há uma divisão clara de etapas no modelo proposto, sendo a seleção de firmas um ponto importante que pode influenciar o funcionamento geral do modelo [81]. A Figura 10 ilustra os passos distintos que compõem o modelo matemático.

Figura 10 – Esquema da construção do modelo matemático



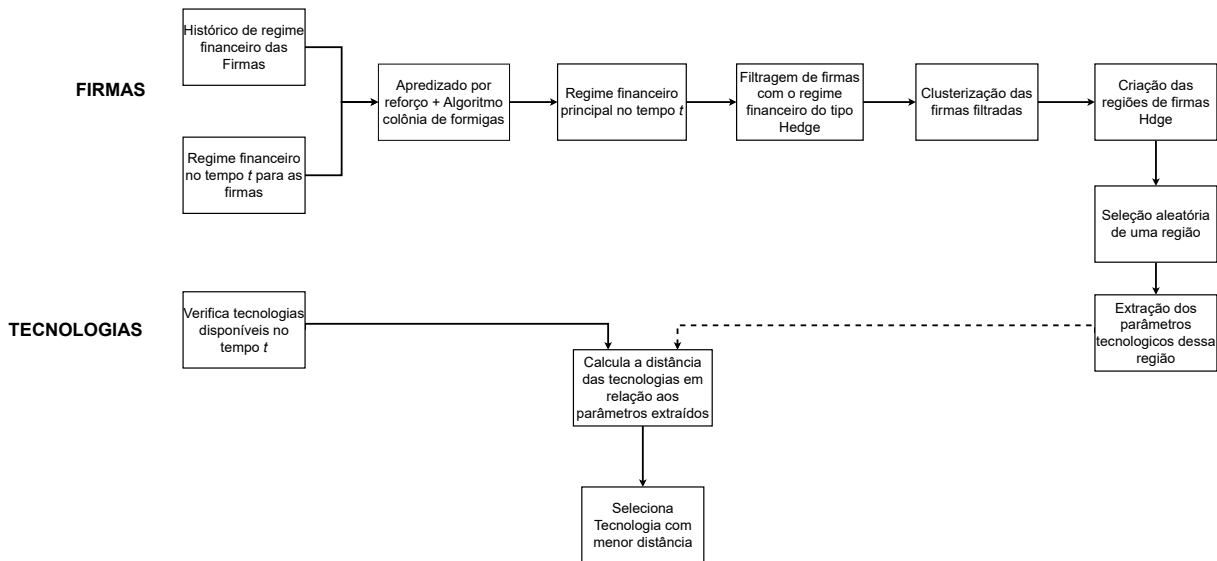
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Partindo da premissa de que as firmas do tipo Hedge são as preferidas do ponto de vista financeiro, como descrito na *Seção 3.2.2.7*, propõe-se uma heurística para o setor

privado de tal forma que o banco possa selecionar a melhor tecnologia com potencial de se tornar uma empresa do tipo Hedge dentro do conjunto de tecnologias disponíveis, implementando, assim, elementos de microprudência alinhados aos acordos de Basileia que poderiam ser aproximados a uma “auto-regulação” financeira no modelo em questão [37].

De acordo com o modelo construído por De Paula [25], a seleção atual é feita de forma aleatória, com base apenas na verificação do preço estimado. Se o preço estiver dentro do limite estabelecido pelo banco para a concessão de empréstimos ( $P_B$ ), a tecnologia é incorporada a uma nova empresa e inserida no sistema financeiro. No entanto, como a seleção é puramente estocástica, nem sempre a melhor tecnologia será escolhida, sob o ponto de vista de que a melhor escolha seria uma tecnologia que permitisse que a empresa adotasse o regime financeiro Hedge logo em seus primeiros passos após sua entrada no sistema. Sendo assim, a modificação proposta com a adição da heurística tem como objetivo remover a característica puramente estocástica na seleção de tecnologias, mas mantém a verificação de preço limite para novos financiamentos. O fluxograma ilustrado pela Figura 11 demonstra o acoplamento da heurística no modelo base supracitado, o qual se encaixa na etapa destacada em azul na Figura 10.

Figura 11 – Fluxograma do funcionamento da heurística inserida no modelo matemático



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

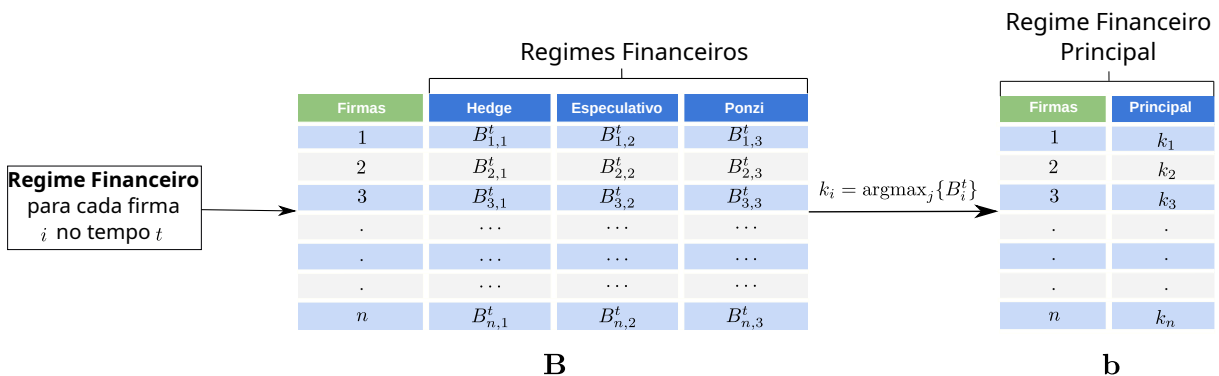
A proposta da heurística é criar agrupamentos de tecnologias que possam potencialmente se transformar em firmas de desempenho Hedge. Para fazer isso, a cada período de tempo, as firmas presentes no sistema são observadas e suas contribuições para a fragilidade financeira são computadas, conforme Equação 3.48. Note que essa equação é equivalente ao denominador da Equação 3.44, uma vez que o interesse aqui é a contribuição individual de cada firma.

$$\phi_i^t = A_{D_i}^t (1 + z^{t-1}) - J_i^t - A_{M_i}^t \quad (3.48)$$

Segundo a Figura 11, a etapa do algoritmo de aprendizado por reforço é compartilhado com o algoritmo de colônia de formigas. Isso ocorre pois os modelos de aprendizado por reforço conhecidos como o *Q-learning* e o  $\epsilon$ -*Q-learning*, utilizam uma estratégia que recompensa as decisões dos agentes e direcionam estes as soluções ótimas. Porém, esta parte da heurística proposta visa criar um mecanismo que seja capaz de identificar qual é o “regime financeiro principal” de cada firma, pois estas podem transitar entre os tipos existentes a cada período de tempo. Portanto, uma política que considera a transição das firmas entre os regimes financeiros foi criada de forma a pesar mais os regimes financeiros atribuídos nos passos de tempo mais recentes em relação ao tempo  $t$ . A estratégia utilizada baseia-se no processo de aprendizado das formigas, que deriva da estratégia de forrageamento através do compartilhamento de informações por meio de modificações no ambiente. O objetivo de usar essa estratégia é permitir que as informações dos regimes financeiros nos períodos de tempos mais antigos impactem menos na decisão do agente e, para isto, é adicionado o efeito da evaporação dos feromônios.

Para isso, foi criada uma matriz de probabilidades de regime financeiro, com o número de linhas equivalente à soma da quantidade de firmas e tecnologias e três colunas referentes a cada regime financeiro (Hedge, Especulativo e Ponzi). A cada período de tempo  $t$  e para cada firma  $i$  presente no sistema, é adicionado um valor proporcional ao complemento da sua contribuição à instabilidade financeira ( $\phi_i^t$ ) na coluna referente ao regime financeiro atual rotulado pelo sistema. Essa estratégia ajuda a fortalecer o regime financeiro ao qual a firma  $i$  já pertenceu, considerando as iterações até o tempo  $t$ , e considera um maior peso nas informações mais recentes com ajuda da dispersão  $\sigma$ . O maior valor de probabilidade associado à firma na matriz indica qual regime financeiro deve ser considerado como mais forte para esta firma. A Figura 12 demonstra esse funcionamento.

Figura 12 – Fluxo utilizado para encontrar o “regime financeiro principal” das firmas no tempo  $t$  utilizando a combinação de aprendizado por reforço com recompensas baseadas no algoritmo de colônia de formigas



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Cada linha da matriz  $B$  representa as probabilidades de pertencimento da firma a cada regime financeiro, o que pode ser associado as probabilidades de transição da

Equação 2.1. Já o algoritmo de colônia de formigas aparece no sistema de recompensas da mesma equação inspirada pela etapa da Equação 2.2. Portanto, a matriz  $B$  no tempo  $t$  é atualizada da seguinte forma:

$$B_{i,j}^t = \frac{(1 - \sigma)B_{i,j}^{t-1} + (1 - \omega_i^t)\phi_i^t}{\sum_{k=1}^3 B_{i,k}^t}, \quad \omega_i^t = \begin{cases} \frac{\phi_i^t}{\sum_{k=1}^3 B_{i,k}^{t-1}}, & \text{se } F_{R_i}^t = j \\ 1, & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.49)$$

onde a taxa de evaporação considerada é  $\sigma = 0,05$ .

O termo que reforça a matriz  $B$  para cada firma é o complemento da contribuição da firma à instabilidade financeira ( $\phi_i^t$ ). Isso ocorre para que haja um reforço positivo para o regime financeiro atual.

O maior valor de  $B_i^t$  indica que a firma  $i$  tem a maior probabilidade de pertencer ao regime financeiro em questão, e esta informação é considerada como “regime financeiro principal”, como destacado pela Equação 3.50.

$$b_i^t = \underset{j}{\operatorname{argmax}}\{B_i^t\} \quad (3.50)$$

A partir do “regime financeiro principal” calculado para cada firma do sistema, é possível identificar um grupo de firmas do tipo Hedge. Isso é feito verificando quais firmas foram classificadas com maior probabilidade de pertencer a esse tipo. De acordo com a Equação 3.32, as firmas do tipo Hedge são identificadas com o valor 1. Assim, um subconjunto dessas firmas é selecionado a partir da Equação 3.50 da seguinte maneira:

$$b_H^t = \{i \mid \forall i \in \{N_{firmas}^t + N_{tech}^t\} \mid b_i^t = 1\} \quad (3.51)$$

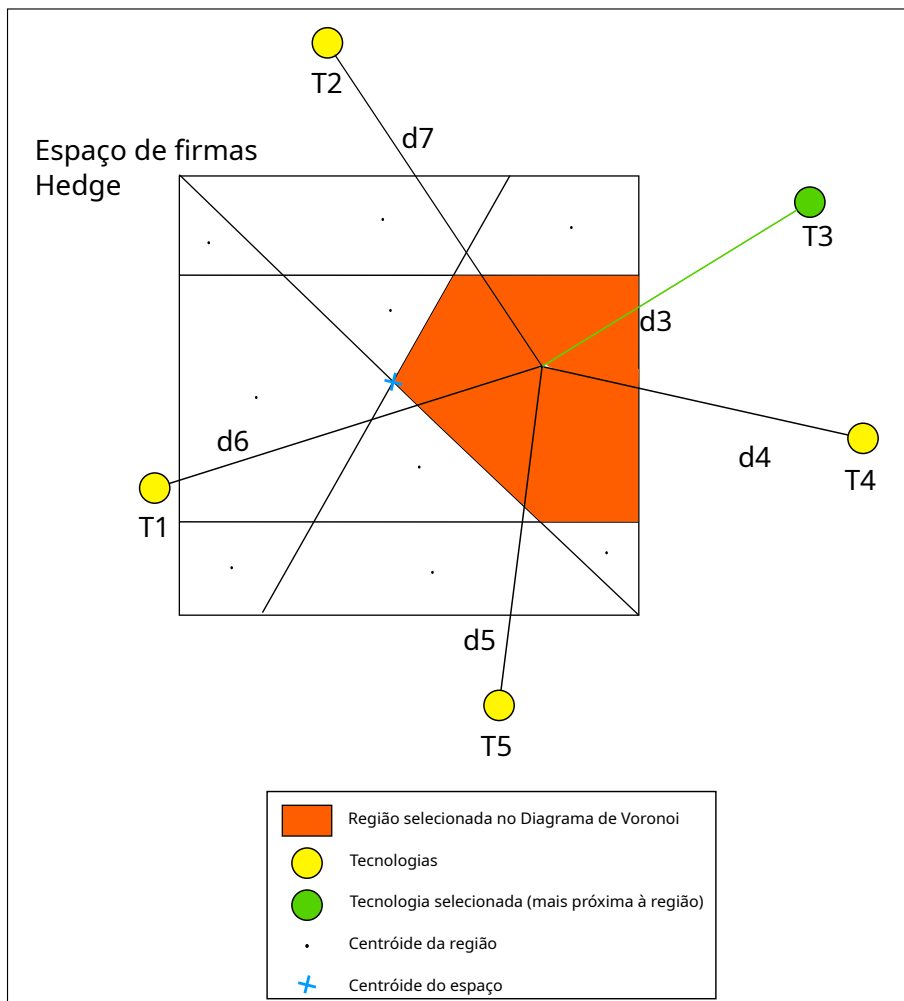
O modelo empregado é similar ao processo de aprendizado por reforço de *actor-critic systems*: o sinal de *feedback* bruto do ambiente é processado por um módulo crítico (matriz  $B$ ), que está aprendendo um modelo, e depois é alimentado ao módulo de ator que implementa a política e a atualiza de acordo com o sinal do crítico, que consiste em uma avaliação da política seguida pelas formigas. No caso deste modelo em particular, o crítico é adaptativo, levando em conta a variabilidade do processo de tráfego, e bastante simples de implementar [55].

Esse subconjunto de firmas,  $b_H$ , é submetido ao processo do Diagrama de Voronoi para criar diferentes regiões (subgrupos) de firmas do tipo Hedge. A importância deste processo está na possibilidade de selecionar, posteriormente, tecnologias que estejam mais próximas à periferia do grupo, ou seja, afastadas do centroide. Dessa forma, é possível evitar vícios de escolha de uma mesma tecnologia que esteja mais próxima ao centroide do grupo de firmas do tipo Hedge e permite uma maior variabilidade de firmas presentes no sistema.

Portanto, ao implementar o Diagrama de Voronoi, regiões são construídas a partir do grupo de firmas Hedge ( $b_H^t$ ) com base nos princípios do algoritmo de *K-means* (Equação 2.6), conforme descrito na Equação 3.52. A Figura 13 fornece uma melhor visualização desse processo.

$$R_k^t = \left\{ \frac{1}{N_k} \sum_{q=1}^{N_k} b_{H_q} \right\} \quad (3.52)$$

Figura 13 – Exemplo do funcionamento do diagrama de Voronoi. O espaço dado é das firmas do tipo Hedge e em laranja um espaço aleatoriamente selecionado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Por fim, um grupo aleatório dentre  $R_{k^*}^t \in R_k^t$  é escolhido com probabilidade uniforme, como descrito pela Equação 3.53. Essa estratégia é uma forma do banco realizar investimentos nos diferentes setores que cada região proporciona. Dessa forma, o banco aplica uma diversificação de seu portfólio de tal forma a diluir os riscos inerentes à concessão de crédito, indo de encontro com o Acordo de Basileia III [82].

$$G^t = U(R_{k^*}^t) \quad (3.53)$$



Com um conjunto de firmas selecionadas com características de Hedge, o objetivo agora é encontrar a Tecnologia com parâmetros mais próximos ao grupo em questão. Para tal, é calculada a distância entre cada tecnologia e o conjunto  $G^t$ . A tecnologia com menor valor de distância será selecionada e submetida à aprovação pelo banco para concessão de crédito, o qual continua verificando se o novo projeto atende ao limiar de preço ( $P_B$ ). Se tudo estiver correto, ela será integrada ao sistema financeiro.

$$\tau = \underset{t_i}{\operatorname{argmin}} \left\{ \left\| t_i - \overline{G^t} \right\| \mid \forall t_i \in \{\text{Tecnologias}\} \right\} \quad (3.54)$$

Uma vez que a tecnologia é selecionada, o processo segue para a verificação de entrada dessa tecnologia como uma nova firma no sistema financeiro. Os valores dos parâmetros de entrada da nova firma ( $\tau$ ) serão calculados conforme a Equação 3.37, Equação 3.38, Equação 3.39 e Equação 3.40, sendo a firma  $j$  representando os valores da firma  $\tau$ . Em seguida, o modelo segue o seu curso normal.

### 3.2.4 Análise de sensibilidade de parâmetros usando Monte Carlo

Em seguida, o modelo é submetido a um estudo de análise de sensibilidade. Utilizando a abordagem de Monte Carlo e seguindo o fluxograma apresentado na Figura 10, alguns parâmetros relevantes do sistema foram variados a fim de entender seu comportamento como um todo. Foram selecionadas dois parâmetros que impactam diretamente no modelo em questão: um referente ao banco e outra à firma. Os parâmetros escolhidos para variação foram a taxa básica de juros ( $\iota$ ) e o *markup* ( $M_k$ ) no momento da entrada da firma no sistema. Para cada um desses parâmetros, foram selecionados 10 valores seguindo uma distribuição uniforme dentro dos limites estabelecidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no Monte Carlo.

Variável	Descrição	Limiares
$\iota$	Taxa de juros	[0,005; 0,015]
$M_k$	<i>Markup</i>	[0,5; 2,0]

O objetivo de realizar uma análise de sensibilidade nos parâmetros desses experimentos é entender o quão sensível o modelo é em relação a esses dados. Para avaliar esse comportamento, é feita uma análise da variável objetivo (fragilidade financeira  $\varphi$ ), verificando se o desempenho do modelo é afetado pela variação dos parâmetros.

A escolha do parâmetro da taxa básica de juros acontece por se tratar de uma variável que pode influenciar significativamente o comportamento financeiro de um sistema econômico [3]. Ela é determinada por um órgão do Estado e é utilizada como uma ferramenta para controlar a inflação e a atividade econômica. A variação da taxa de juros pode afetar diversas variáveis financeiras, como os investimentos, as dívidas, o consumo e

a oferta de crédito [3]. Por isso, é importante avaliar o impacto que a variação da taxa de juros pode ter sobre a estabilidade financeira do sistema.

Já a escolha do *markup* acontece por essa variável ser uma informação básica no lado das firmas e por representar a margem de lucro que uma empresa adiciona ao seu custo para definir o preço de venda de um produto ou serviço [78]. Logo na entrada da firma o *markup* é pré-definido, mas nos períodos seguintes ela é regida pela Equação 3.23. Ela é um indicador importante da capacidade de uma empresa em gerar lucros e pode ser influenciada por diversos fatores, como a concorrência, a demanda do mercado, os custos de produção, entre outros. A variação do *markup* pode afetar diretamente o preço final do produto ou serviço, bem como o volume de vendas da empresa [78]. Portanto, é importante entender como a variação do *markup* no momento da definição da firma pode afetar a parcela de contribuição da firma para a estabilidade financeira ao longo do tempo.

Através da análise de sensibilidade da taxa de juros e do *markup* no modelo, é possível verificar como o sistema reage às mudanças nesse parâmetro e se ele é capaz de se manter estável diante dessas alterações.

### 3.3 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Os experimentos computacionais foram iniciados com a reprodução dos resultados alcançados em [17] utilizando a ferramenta LSD na versão 8.0 [83]. Para isso, as equações descritas na modelagem apresentada na Seção 3.2 foram seguidas. Devido à natureza estocástica do modelo, foram realizadas 30 simulações para obter uma compreensão do comportamento médio do sistema.

O modelo é composto, no período inicial, por 100 firmas, 300 tecnologias e um único banco. As tecnologias podem se transformar em novas firmas a cada passo de tempo, após uma avaliação por parte do banco de acordo com a definição da *Seção 3.2.2.8*. As tecnologias disponíveis não variam ao longo do tempo, mas quando uma empresa é excluída do sistema, a tecnologia utilizada torna-se disponível novamente. Todas as simulações deste sistema evoluem até o passo de tempo 1.000.

As análises demonstradas consideram a mediana das simulações em cada passo de tempo, pois esta é uma medida de tendência central que pode ser usada para representar o comportamento típico dos resultados das simulações e é menos sensível a valores extremos do que a média [47], o que pode ser útil em situações em que há uma variação considerável nos resultados. Usar a mediana das simulações em cada passo de tempo permite obter uma ideia de como os resultados variam ao longo do tempo e quais são os valores típicos que podem ser esperados, o que pode ajudar a entender melhor o comportamento do sistema simulado e a tomar decisões com base nessas informações, além de possibilitar uma melhor representação gráfica no contexto de comparação de diferentes métodos [84].

Os experimentos foram divididos em duas fases, a fim de comparar o desempenho entre elas, com foco no comportamento da estabilidade financeira. As fases são:

- Transcrição e execução do modelo matemático exatamente como definido por De Paula [17] no LSD, sendo este inicialmente desenvolvido em NetLogo na versão 3.1.5 [85], o qual é chamado de **modelo base** ou **base**;
- Adição da heurística sugerida pela **Seção 3.2.3** ao modelo, onde este é citado ao longo do trabalho como **modelo heurístico** ou **heurística**.

Para o modelo com a adição da heurística, decidiu-se aplicá-la somente a partir do passo de tempo 300. No entanto, a matriz B definida na Equação 3.49 é preenchida desde o período inicial. Essa abordagem foi adotada para permitir que a heurística começasse a atuar após um período de análise do cenário do sistema, garantindo que as decisões tomadas fossem baseadas em situações reais criadas pela simulação. Além disso, a partir do tempo 300 a heurística pode ser aplicada com 70% de probabilidade em cada período de tempo. Dessa forma, introduz-se uma aleatoriedade forçada no sistema em alguns períodos de tempo. Nesse contexto, introduzir aleatoriedade na heurística pode ajudar a evitar que ela fique presa em uma solução sub ótima ou limitada, permitindo que a heurística explore outras opções e descubra soluções melhores [86, 87].

A Tabela 3 e a Tabela 4 definem as variáveis e os valores utilizados no passo inicial das simulações. Cabe ressaltar que algumas variáveis sofrerão a variação proposta na análise do método de Monte Carlo, conforme definido na **Seção 3.2.4**.

Tabela 3 – Valores utilizados nos parâmetros que são constantes

Parâmetros constantes		
Variável	Descrição	Valor
$\Lambda$	Grau de heterogeneidade ou assimetria	0,6 (desvio-padrão)
$A$	Diferenciação de produto	0,5 (média)
$T$	Coeficiente de transformação	0,5 (média)
$F$	Custo fixo	1,0 (média)
$W$	Salário	1
$\iota^*$	Taxa básica de juros	0,01
$\lambda$	Taxa de ajustamento de $M$	0,1
$\alpha$	Controle do peso de $\varphi$ no cálculo do spread bancário	0,99
$K_{tit}^t$	Porcentagem mínima de aplicação em títulos públicos	0,05
$K_{tit}^t$	Porcentagem máxima de aplicação em títulos públicos	0,95

Fonte: Adaptado de De Paula [25].

Tabela 4 – Valores utilizados como condições iniciais

Condições iniciais		
Variável	Descrição	Valor
$\zeta^0$	Aplicação mínima em títulos	0,1
$z^0$	Taxa inicial de juros de empréstimo	0,1
$K_{bank}^0$	Volume de capital inicial do banco	1.000
$C_i^0$	Competitividade	1
$M_k^0$	<i>Markup</i>	1,2
$M_i^0$	<i>Market share</i>	0,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Reforçando, o objetivo com os experimentos é entender se a adição da heurística ao modelo base trás benefícios agregados ao modelo como um todo. Ou seja, espera-se validar que a heurística impacta positivamente na diminuição da instabilidade financeira, fazendo, então, com que o modelo torne-se mais estável.

### 3.3.1 Experimentos na análise de sensibilidade com Monte Carlo

A análise de sensibilidade foi realizada utilizando o método de Monte Carlo. As variáveis incluídas na análise foram a taxa de juros básica ( $\iota$ ) e o *markup* ( $M_k$ ), cada uma com 10 valores diferentes, conforme definido na **Seção 3.2.4**. A análise é aplicada apenas no modelo heurístico.

Os dois parâmetros selecionados para análise resultam em um total de 100 combinações possíveis entre eles. Para obter o entendimento sobre o comportamento da fragilidade financeira em relação à variação desses parâmetros com a abordagem de Monte Carlo, foram utilizados uma amostragem de 25% das possíveis combinações.

Para cada combinação de valores das variáveis, os experimentos foram executados 30 vezes. A mediana de cada grupo de simulações foi utilizada para comparar os resultados entre as diferentes combinações de valores. Sendo assim, foram executados um total de 750 simulações para esse modelo. As simulações ocorreram utilizando mecanismo de paralelismo oferecido pelo LSD com a opção de 16 execuções em paralelo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

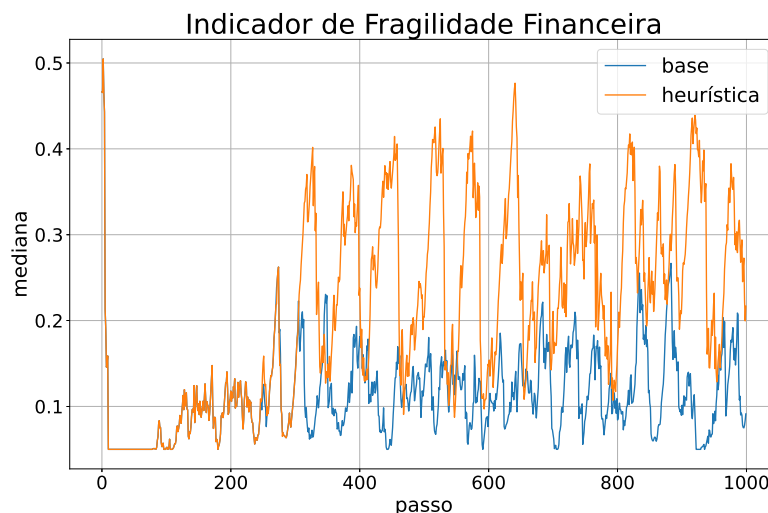
Este capítulo apresenta os resultados alcançados com cada experimento proposto e descrito no Capítulo 3. Os resultados mostram o comportamento tanto do agente do tipo Banco quanto dos agentes do tipo Firma, destacando as variáveis distintas de cada.

A análise destaca a métrica de fragilidade financeira, calculada de acordo com a Equação 3.44. Esta medida fornece uma ideia do desempenho do modelo perante as alterações propostas. Como anteriormente destacado, devido ao comportamento estocástico associado ao modelo, todo o fluxo do algoritmo foi executado 30 vezes. Todos os resultados apresentados a seguir são referentes à mediana dessas execuções ao longo do tempo.

### 4.1 RESULTADOS DO MODELO PROPOSTO

Após adicionar os métodos de Inteligência Artificial na tomada de decisão do Setor Bancário, o primeiro aspecto a ser comparado em relação ao modelo base de De Paula [25] é a variável objetivo deste estudo, a instabilidade financeira, que é medida através do grau de fragilidade financeira percebida pela Equação 3.44. Portanto, as análises deste trabalho iniciam-se com uma comparação do indicador de fragilidade financeira do sistema entre o modelo de base e o modelo com a heurística com a composição de métodos de Inteligência Artificial aplicada. Em seguida, é realizada uma análise detalhada dos resultados obtidos ao se observar o comportamento das firmas. Além disso, também é realizada uma análise sob a perspectiva do banco, permitindo assim a avaliação do resultado agregado do sistema financeiro e permitindo entender a evolução do modelo proposto. Por fim, discutem-se os resultados da análise da variação dos parâmetros por meio do método de Monte Carlo.

Figura 14 – Comparação da fragilidade financeira

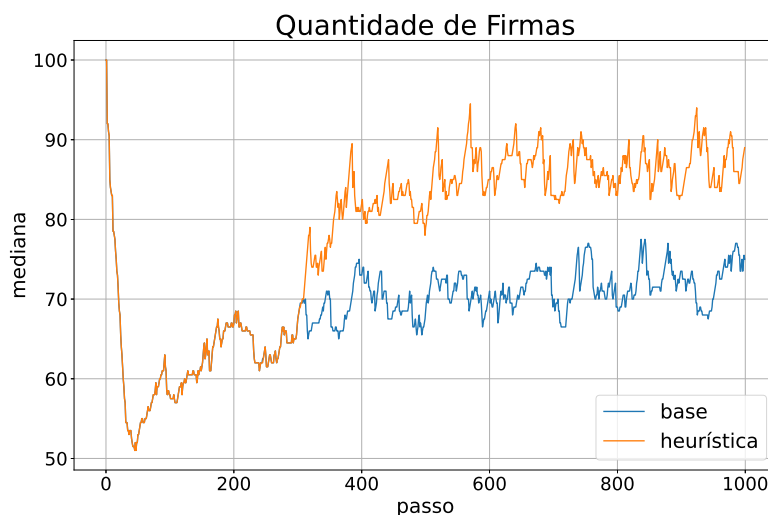


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 14 ilustra a evolução da instabilidade financeira ao longo do tempo. Quanto maior o valor observado, mais frágil está o sistema, indicando uma maior instabilidade financeira. Conforme ilustrado, é evidente que o modelo com aplicação da heurística resultou em maior fragilidade para o sistema financeiro como um todo, comparado ao modelo de base que apresentou níveis mais baixos e estáveis de fragilidade. Os resultados indicam que a estratégia de priorizar tecnologias com potencial de se tornarem firmas financeiramente estáveis não obteve resultado positivo para a estabilidade do sistema financeiro.

O resultado apresentado na Figura 14 refuta a hipótese inicial deste trabalho de que a adição de inteligência artificial por meio da heurística traria melhorias significativas para o desempenho financeiro do sistema. Contudo, é importante prosseguir com a análise deste resultado para entender o comportamento agregado do sistema e identificar as razões que levaram a não validação desta hipótese. É necessário analisar as outras informações geradas pelo modelo para compreender o resultado completo da simulação. Além disso, é necessário levar em consideração que a adição de inteligência pode afetar o sistema financeiro de maneira diferente em cada um dos agentes. Por exemplo, mesmo não trazendo benefícios para o sistema financeiro de forma agregada, a heurística pode trazer resultados positivos para um agente específico quando analisado de forma isolada. Desta forma, é importante avaliar o comportamento da heurística nos diferentes tipos de agentes presentes no modelo.

Figura 15 – Comparação da quantidade de firmas por abordagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

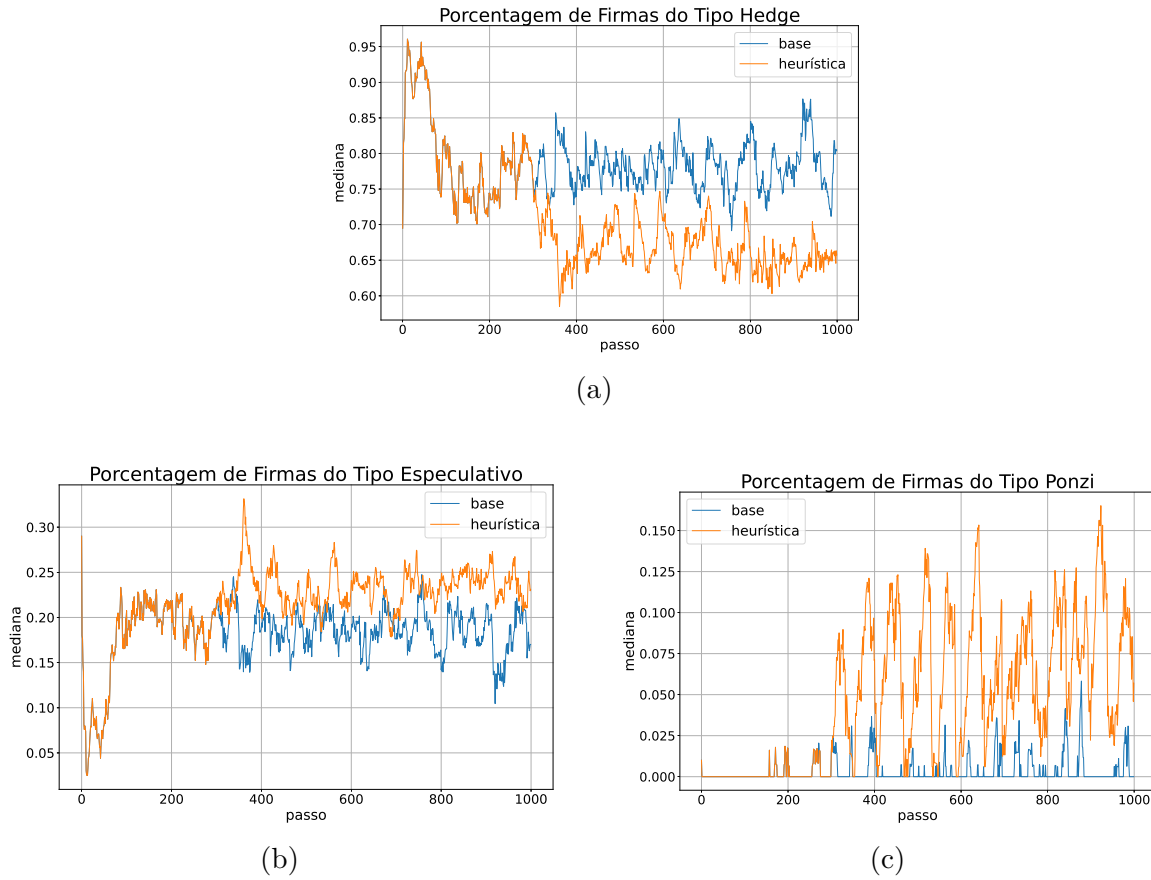
Iniciando a análise pelo agente firma, pode-se analisar a quantidade de firmas comportadas no sistema com as modificações propostas pela adição da heurística em comparação ao modelo de base pode fornecer informações relevantes. A Figura 15 mostra que as modificações propostas no modelo permitem que mais empresas sejam incluídas no

sistema na maior parte dos períodos de tempo. Os períodos mais beneficiados com aumento da quantidade de firmas no sistema são entre os períodos de tempo 300 e 400, que é onde a heurística começa a ser aplicada de fato. Após esse período percebe-se uma estabilidade na quantidade e variação de firmas no sistema, seguindo o padrão do modelo base, porém em um patamar mais elevado. Os períodos de crise são caracterizados pela queda na quantidade de firmas observada na Figura 15 e pela alta da instabilidade financeira da Figura 14. Esse cenário é intensificado no modelo com a aplicação da heurística.

Para compreender o perfil das firmas que compõem o sistema, é importante comparar os tipos de firmas através de seu regime financeiro, como ilustrado na Figura 16. De acordo com a Figura 16.a, é possível verificar que a porcentagem de firmas do tipo Hedge mantêm-se estáveis no modelo original, representando cerca de 80% das empresas do sistema. Entretanto, na solução proposta pela heurística, houve uma redução significativa da proporção de firmas do tipo Hedge ao longo do tempo. Por outro lado, houve um aumento da porcentagem de firmas do tipo Especulativo, conforme pode ser visto na Figura 16.b. Já no que diz respeito às firmas do tipo Ponzi, observado pela Figura 16.c, houve um crescimento na proporção, o que contraria o que era esperado com a aplicação do novo modelo. Isso indica que a heurística resultou em um aumento no número de empresas no sistema, mas sem melhorar a retenção das empresas Hedge no sistema. Porém, nos momentos alta concentração de firmas do tipo Hedge é possível observar vales na instabilidade financeira ilustrada pela Figura 14.

Em suma, a análise dos dados apresentados na Figura 15 e Figura 16 indicam que a aplicação da heurística teve um impacto significativo na composição do sistema financeiro, mas não necessariamente na direção esperada. Embora tenha havido um aumento no número de empresas do tipo Especulativo e Ponzi, houve uma redução no número de firmas do tipo Hedge, que era um dos impactos positivos mais esperado com a aplicação da heurística. Já quando a Figura 14 e a Figura 16 são analisadas em conjunto, percebe-se que o modelo com a aplicação da heurística demonstra uma maior instabilidade financeira devido ao fato de surgir uma maior concentração de firmas do tipo Ponzi. Isso ocorre porque essas firmas não conseguem honrar seus empréstimos com o banco, e a fragilidade, medida pela Equação 3.44, demonstra que quanto maior for a inadimplência, maior será a instabilidade financeira. É importante explorar um pouco mais os resultados para compreender os motivos deste comportamento e avaliar se as mudanças foram benéficas para o sistema financeiro de alguma outra maneira.

Figura 16 – Composição do sistema por tipo de regime financeiro das firmas (a) Porcentagem de firmas do tipo Hedge. (b) Porcentagem de firmas do tipo Especulativo. (c) Porcentagem de firmas do tipo Ponzi.



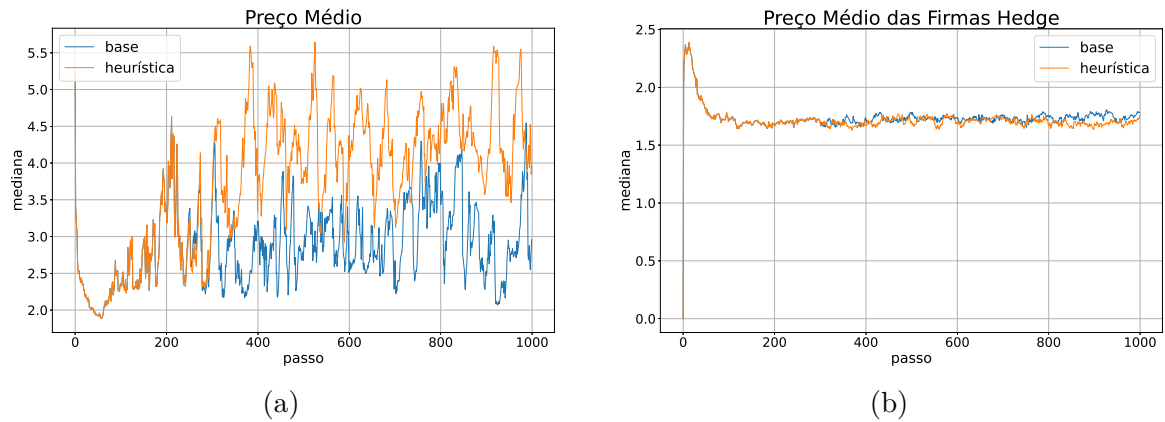
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para as firmas que compõem o sistema, é possível observar o preço médio praticado tanto de forma geral, considerando todos os tipos de firmas, quanto mais focado nas firmas do tipo Hedge. Particularmente, essa distinção pode ser relevante para compreender a queda na quantidade de empresas do tipo Hedge, as quais se esperava que fossem positivamente impactadas pela aplicação da heurística. Assim, a Figura 17 apresenta uma análise dos preços médios praticados nestes dois cenários.

Analisando o resultado fornecido pela Figura 17.a, nota-se que o preço médio praticado de forma geral no modelo com a heurística foi superior ao observado no modelo base. Porém, os preços se mantiveram estáveis com o avanço da simulação. Observa-se alguns picos de preço que casam com os picos de quantidade de firmas presentes no sistema destacados pela Figura 15. Nota-se ainda que entre os períodos de tempo 800 e 1000 os preços médios praticados pelas firmas Hedge na heurística ficaram inferiores aos tempos anteriores e menores em relação ao modelo base. Isso explica-se pelo fato de nesse período ter menos firmas desse tipo presentes no sistema, como destacado pela Figura 16.



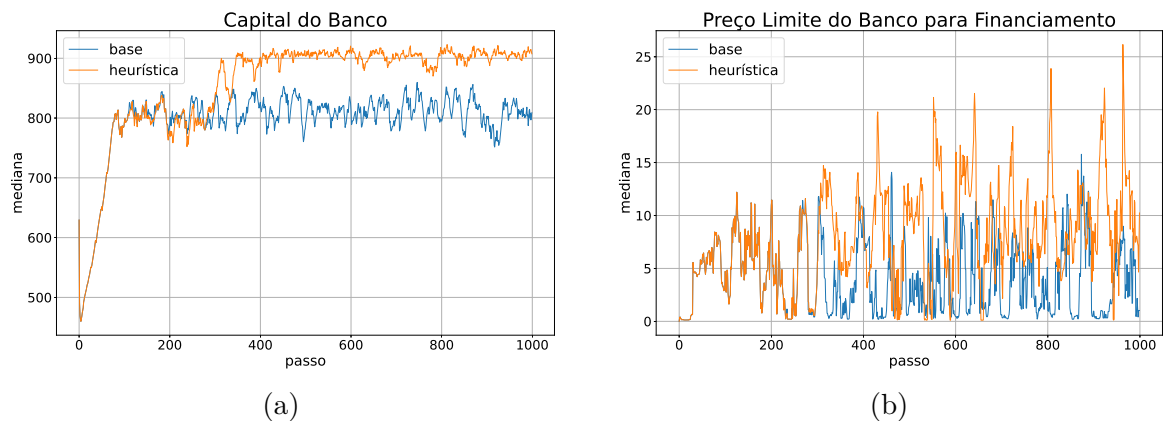
Figura 17 – Comparação do preço praticado médio observado (a) Firmas de forma geral (b) Firmas do tipo Hedge



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Analisando alguns indicadores do banco, como o seu capital ( $K_{bank}$ ) e o preço limite estabelecido pelo banco para entrada de novas firmas ( $P_B$ ) ao longo do tempo, pode-se tentar correlacionar com a quantidade e qualidade de firmas no sistema. A Figura 18 mostra que do período de tempo 300 ao 400, houve a maior variação de aumento de capital do banco (a). O banco se mostra aberto a novos investimentos quando o preço limite para financiamento (b) está baixo. Como o banco está confortável em relação ao seu capital, os preços são mantidos baixos ao longo do tempo. Porém em momentos de percepção que uma queda do seu capital é ensaiada, os preços limites são levemente aumentados. Quando há mais recursos disponíveis, a concessão de crédito se torna mais flexível e mais empresas passam a ter acesso ao sistema financeiro, porém é necessário que atendam ao critério de preço estabelecido pelo banco. Por conta disto, é possível explicar os níveis altos e estáveis de firmas na Figura 15.

Figura 18 – Variáveis comportamentais do lado do banco (a) Capital do banco (b) Preço limite para concessão de financiamento

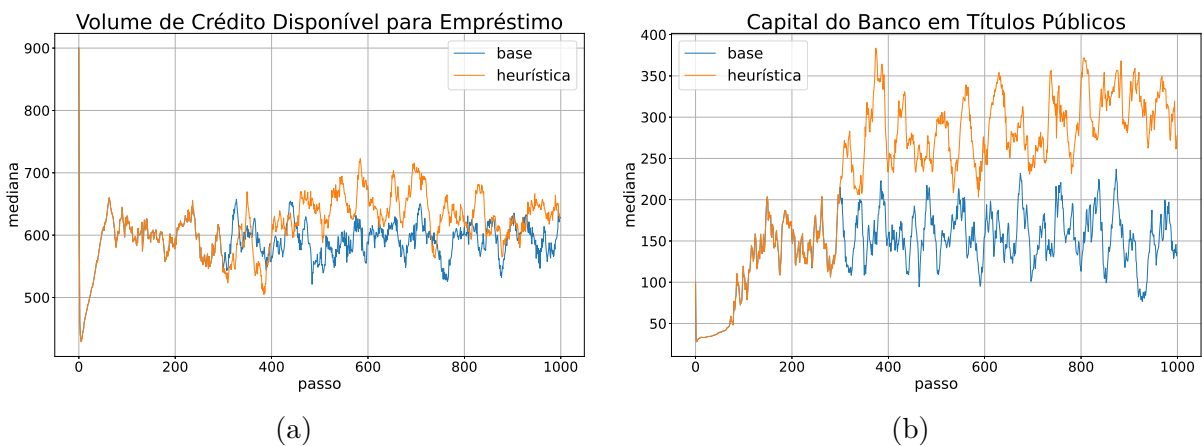


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Sobre o capital do banco observado na Figura 18.a, é possível entender como o banco fez a aplicação desse capital ao longo do tempo. O banco define uma estratégia de alocar parte do dinheiro para o financiamento e desenvolvimento das firmas e a outra parte fica retido como aplicação em fundos de investimento, conforme discutido na *Seção 3.2.2.3*.

A porcentagem do investimento em títulos públicos fica a cargo da variável  $\varsigma$ , sendo esta função do *spread* bancário. A Figura 19 demonstra essas aplicações detalhadas e separadas entre crédito concedido para as firmas e investimento em títulos públicos. Apesar dos bancos estarem com um capital maior na solução com a heurística em relação ao modelo base, conforme a Figura 18.a, é possível notar que o banco não aumenta seu nível de crédito disponível para empréstimos através da Figura 19.a. No modelo com a aplicação da heurística, a maior parte do excedente de recurso em relação ao modelo base o banco faz uma clara decisão em investir em títulos públicos, demonstrando uma certa preocupação com o cenário econômico e, assim, escolhendo um caminho mais seguro de aplicação, conforme observado na Figura 19.b.

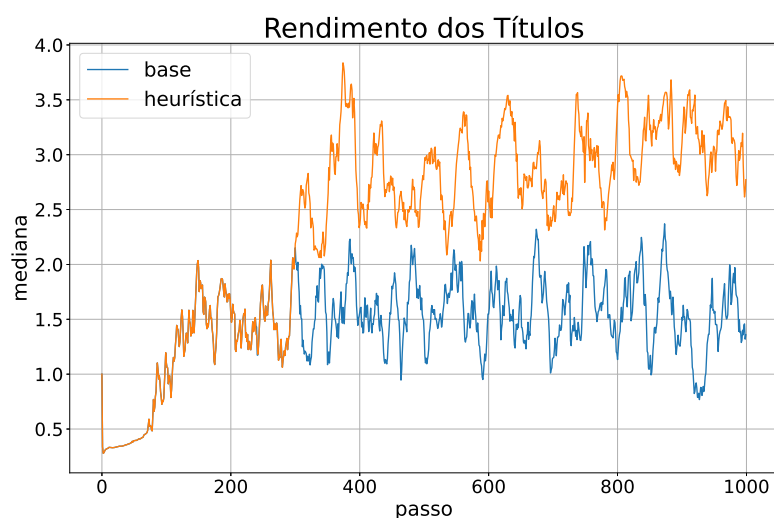
Figura 19 – Comportamento de investimento do banco (a) Capital disponível para distribuição de crédito às firmas (b) Capital aplicado em títulos públicos



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O comportamento de investir a maior parte do recurso excedente em títulos públicos indica uma preferência por liquidez, ou seja, a priorização em manter o dinheiro disponível em uma aplicação segura e facilmente acessível. Isso pode ser consequência da preocupação dos bancos com o cenário econômico e incerto, fazendo com que escolham um caminho mais seguro de aplicação. Dessa forma, a preferência por liquidez é evidente na análise do comportamento de investimento do banco observado na Figura 19. Além disso, o alto rendimento das aplicações em títulos públicos, apresentado na Figura 20, reforça a preferência por essas aplicações.

Figura 20 – Comparação do rendimento das aplicações do banco em títulos públicos



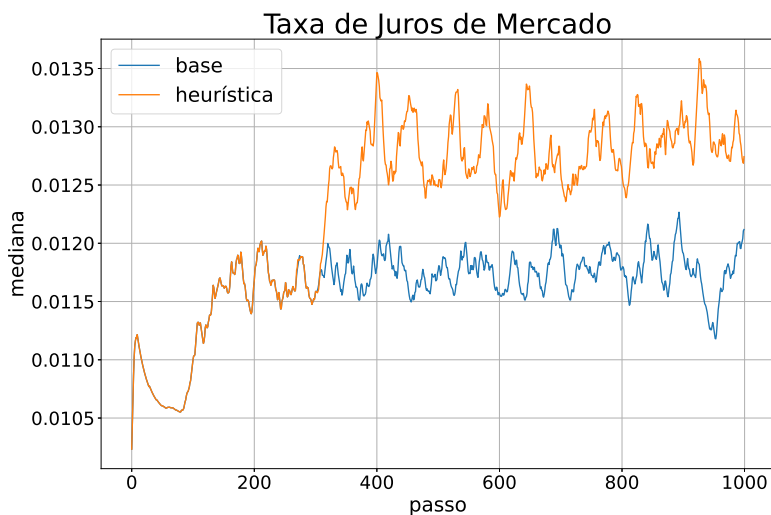
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Examinando novamente a Figura 16 para entender o comportamento do sistema sob o aspecto das firmas, é relevante observar a evolução da taxa de juros de mercado. Esta informação pode ser crucial para compreender o fenômeno do aumento do capital do banco em detrimento da emergência de firmas de baixa qualidade. De acordo com a Figura 21, é possível perceber que a taxa de juros apresenta uma tendência de crescimento no modelo com a aplicação da heurística, enquanto no modelo base a taxa apresentava uma estabilidade maior. Esse aumento da taxa de juros significa que as firmas têm que arcar com uma carga tributária elevada, tornando o pagamento da dívida do crédito tomado junto ao banco mais difícil. Conforme o tempo passa, algumas firmas não conseguem pagar a dívida completa, pagando apenas os juros, entrando assim no regime Especulativo. Em casos mais graves, as firmas deixam de honrar todas as partes das suas dívidas, entrando no regime financeiro Ponzi. Desta forma, é possível entender a relação entre o lucro do banco, a quantidade de firmas presentes no sistema e a distribuição destas nos regimes financeiros Hedge, Especulativo e Ponzi.

Com base nos dados apresentados, fica claro que o banco foi o principal beneficiado com a modelagem proposta com a inclusão da heurística. Inicialmente, as firmas de qualidade entraram no sistema, fornecendo certa segurança para que o banco distribísse crédito. Quando essas firmas cumpriram as suas obrigações financeiras com o banco elevaram o capital dele. Por sua vez, o banco preferiu realizar investimentos seguros em vez de retornar esse crédito ao sistema. Nesta modelagem, o banco acaba agindo de acordo com suas próprias vontades, principalmente devido a dois fatores: a ausência de um setor bancário composto por mais bancos e a falta de regulamentação governamental, como, por exemplo, a taxa de juros básica praticada. Este último aspecto seria muito importante na modelagem deste problema, pois em períodos de baixo investimento do banco na

distribuição de crédito, o governo poderia agir, reduzindo a taxa de juros, resultando em rendimentos menores para os bancos nas aplicações em títulos públicos e incentivando investimentos nas firmas, que, apesar do risco, seriam mais rentáveis do que as aplicações em títulos. Para isso, seria necessário a inclusão de um novo tipo de agente no modelo.

Figura 21 – Comparação da taxa de juros de mercado



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Considerando a inclusão de um novo tipo de agente representando o governo, onde este realiza algumas intervenções, o modelo estaria mais alinhado à teoria keynesiana no sentido em que Keynes propunha que o Estado agisse como um regulador da economia, intervindo de forma contracíclica, ou seja, aumentando os gastos públicos em momentos de recessão e diminuindo-os em momentos de alta inflação [3].

Ainda na tentativa do entendimento do motivo que levou a invalidação da hipótese de melhoria da estabilidade financeira com a introdução da heurística, chama atenção a literatura econômica que traz o paradoxo da parcimônia, que diz que a tentativa individual de economizar pode trazer uma queda geral na demanda e, como resultado, uma contração na economia [3]. A teoria diz ainda que isso ocorre porque o aumento da poupança individual resulta em uma queda na demanda por bens e serviços, o que, por sua vez, pode levar a uma contração na produção e a uma queda nos níveis de emprego e renda.

Esse paradoxo pode ser aproximado para o banco no cenário do modelo proposto, uma vez que escolhe novos projetos com potencial de tornarem-se firmas do tipo Hedge e depois a escolhe aplicar seus recursos majoritariamente em títulos públicos, preferindo exclusivamente o benefício individual. Isso resultou na queda da quantidade de bens e serviços disponíveis (firmas) que por sua vez diminuiu a quantidade de produção do sistema, aumentando a instabilidade sistêmica.

A proposta de inserir microprudências no sentido da auto-regulação no modelo

através da heurística se mostrou ineficiente para o propósito de reduzir a instabilidade financeira. Essa proposta se baseia nos acordos de Basileia, principalmente o Acordo de Basileia II em 2004, que tinha como um de seus pilares a ideia de transformar uma estratégia de regulação tutelar para um método em que os próprios bancos são incentivados a mensurar seus riscos e melhorar seus sistemas internos de controle, reforçando a necessidade de gestão do risco sistêmico que a atividade bancária representa [88]. Porém, com o cenário econômico criado com a crise do *subprime* em 2008, um novo acordo foi proposto, mas sem grandes reformulações [82]. Basicamente, no Acordo de Basileia III de 2014 foi realizado apenas enrijecimento dos pontos já destacados por Basileia II, principalmente no que diz respeito sobre a regulação financeira.

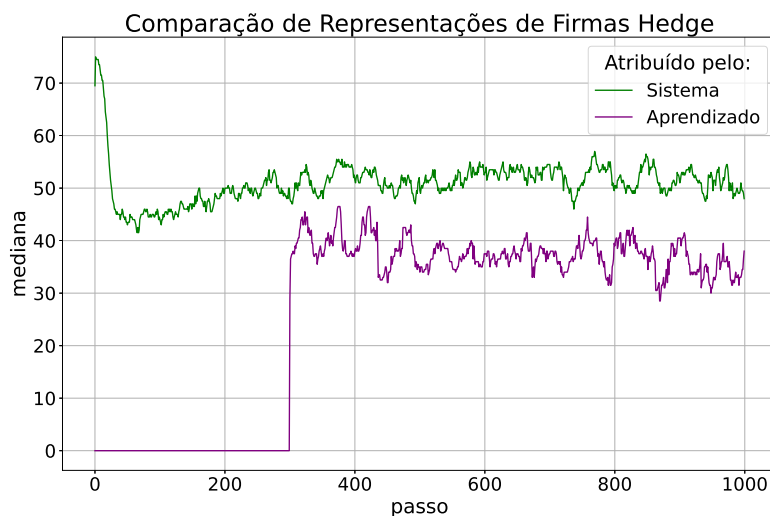
Dessa forma, os resultados aqui apresentados reforçam as críticas ao Acordo de Basileia III levantadas por Leite & Reis [88], que afirmam que o endurecimento da regulação financeira promovido pelo acordo pode fazer com que as instituições financeiras sejam atraídas pelos altos lucros aliados à frouxa, ou até inexistente, regulação. Conforme os resultados obtidos em relação aos lucros do banco com a inserção da auto-regulação com a heurística, é possível afirmar que atribuir apenas ao setor bancário o papel de fazer regulações não é suficiente. Reforça-se, então, que necessário que o Estado assuma um papel mais ativo na regulação do sistema financeiro, garantindo maior estabilidade e reduzindo os efeitos de crises financeiras.

## 4.2 ANÁLISE DOS COMPONENTES DA HEURÍSTICA

A heurística apresentada para este problema é composta por duas principais etapas: a primeira etapa de aprendizado por reforço e a segunda etapa de clusterização. Na primeira etapa, é atribuído o “regime financeiro principal” às firmas utilizando o sistema de recompensas baseado no comportamento de formigas. Já na segunda etapa, é realizada a clusterização no espaço de firmas Hedge selecionadas pelo algoritmo de aprendizado.

A Figura 22 demonstra a percepção do algoritmo de aprendizado por reforço sobre quais firmas realmente são do tipo Hedge em relação à quantidade de firmas desse tipo observadas pelo sistema. Nota-se que o algoritmo sempre é mais conservador ao considerar firmas Hedge em relação ao que é rotulado pelo sistema. Nos primeiros 300 passos não há aplicação da heurística e, portanto, não há resultados a serem observados quanto ao aprendizado até esse ponto. No entanto, o algoritmo já capta desde o início as flutuações entre os regimes financeiros realizados pelas firmas. Por isso, o comportamento de considerar menos firmas do tipo Hedge ocorre desde o primeiro passo de tempo da aplicação da heurística.

Figura 22 – Comparação da atribuição de firmas do tipo Hedge pelo sistema e pela heurística



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Tabela 5 apresenta os centroides em relação aos parâmetros extraídos da etapa de rotulagem do algoritmo de aprendizado por reforço, tanto antes como depois da clusterização. Pode-se observar que o espaço geral de firmas Hedge é representado por altos valores de diferenciação do produto ( $A$ ) e custo fixo ( $F$ ). No entanto, quando os grupos criados nesse espaço são analisados, é possível perceber um comportamento diferente em cada um deles e que se diferem do centroide do espaço. Embora o grupo geral demonstre um alto custo fixo, somente o *cluster* 1 acompanha essa tendência, enquanto os demais apresentam níveis menores desse parâmetro.

Isso sugere que se o banco considerasse apenas o centroide do espaço de firmas Hedge para selecionar projetos de firmas similares, ele estaria propenso a escolher apenas firmas com alto custo fixo. No entanto, observa-se que as firmas com os três parâmetros ( $A$ ,  $T$  e  $F$ ) em níveis médios também têm potencial para serem classificadas como Hedge. Portanto, a estratégia de segmentar o espaço se mostra eficaz, pois permite a seleção de projetos de firmas com características distintas e com potencial para performar com o regime financeiro Hedge.

Observe que se o banco selecionar apenas firmas com custos fixos elevados, o sistema estaria caminhando em direção à formação de oligopólios, o que dificultaria a entrada de novas empresas e poderia aumentar os riscos para o banco. Como parte de um sistema de auto-regulação, é importante que o banco adote estratégias para mitigar esses riscos e idealmente garanta a estabilidade financeira do sistema.

Dessa forma, é importante considerar a clusterização ao selecionar as firmas para um projeto, a fim de garantir que uma variedade de firmas com diferentes perfis possam

ser selecionadas para diversificar a forma com que o banco realiza uma seleção de novas firmas e diminuir o risco sistêmico.

Tabela 5 – Parâmetros extraídos na etapa da rotulação de firmas Hedge pelo aprendizado por reforço, onde  $\mathbf{A}$  é a tecnologia do produto,  $\mathbf{T}$  é a tecnologia do processo e  $\mathbf{F}$  o custo fixo associado.

<b>Grupo</b>	<b>A</b>	<b>T</b>	<b>F</b>
Geral	0.6233	0.5010	0.8470
<i>Cluster 1</i>	0.6615	0.4910	0.9715
<i>Cluster 2</i>	0.4628	0.4501	0.5829
<i>Cluster 3</i>	0.6080	0.5514	0.6677

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para a análise de sensibilidade utilizando Monte Carlo com a variação dos parâmetros da taxa básica de juros ( $\iota$ ) e do *markup* inicial ( $M_k$ ) em relação à fragilidade financeira ( $\varphi$ ), os resultados podem ser observados na Tabela 6. Foram executadas 30 simulações para cada combinação de valores de  $\iota$  e  $M_k$ , e os resultados mostrados na tabela são as estatísticas agregadas de todas as simulações.

A Tabela 6 indica uma alta volatilidade na instabilidade financeira do sistema. Cada combinação de valores dos parâmetros  $\iota$  e  $M_k$  gera diferentes comportamentos para a fragilidade percebida pelo sistema. De maneira geral, quando um valor de  $\iota$  é fixado, a fragilidade sistêmica tende a diminuir com o aumento do valor de  $M_k$ . Porém, ao fixar um valor de  $M_k$  para entender o comportamento da fragilidade com o aumento da taxa básica de juros, o inverso pode ser observado. Nesses casos, o aumento do valor de  $\iota$  para um mesmo valor de  $M_k$  mostra uma tendência de aumento da instabilidade financeira do sistema. Por exemplo, fixando o valor de  $M_k = 0.8541$ , as execuções que assumem esse valor são 3, 6, 16, 19 e 24 e, nesses casos, o valor associado à média de  $\varphi$  apresenta uma tendência de aumento.

Tabela 6 – Resultados obtidos com as simulações utilizando o método de Monte Carlo

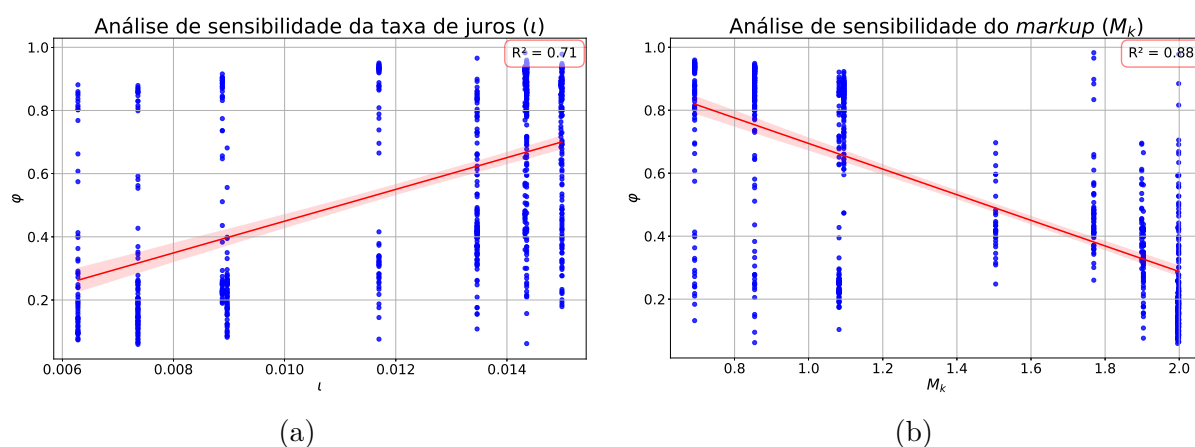
Combinação	$\iota$	$M_k$	$\varphi$				
			média	Desvio padrão	Mediana	Mínimo	Máximo
1	0.0063	0.6922	0.5166	0.2675	0.4081	0.1318	0.8813
2	0.0063	1.9958	0.1345	0.0476	0.1263	0.0736	0.2857
3	0.0074	0.8541	0.5526	0.2996	0.5717	0.0949	0.8790
4	0.0074	1.9958	0.1792	0.1070	0.1543	0.0594	0.5921
5	0.0074	1.9986	0.1633	0.0711	0.1543	0.0641	0.3691
6	0.0089	0.8541	0.7879	0.1723	0.8709	0.2747	0.9156
7	0.0089	1.0819	0.2313	0.0231	0.2272	0.1897	0.2934
8	0.0090	1.0819	0.2611	0.0949	0.2546	0.1035	0.6813
9	0.0090	1.9986	0.1880	0.1001	0.1706	0.0820	0.5562
10	0.0117	0.6922	0.8937	0.0671	0.9271	0.6960	0.9504
11	0.0117	1.9033	0.2962	0.1001	0.3083	0.0760	0.6652
12	0.0135	1.0949	0.7835	0.0929	0.7996	0.4733	0.8991
13	0.0135	1.5046	0.4473	0.1079	0.4195	0.2480	0.6968
14	0.0135	1.7695	0.4518	0.1441	0.4133	0.2602	0.9655
15	0.0135	1.9033	0.3380	0.1066	0.3599	0.1083	0.5628
16	0.0143	0.8541	0.8992	0.0475	0.9245	0.7695	0.9398
17	0.0143	1.7695	0.5174	0.1550	0.4724	0.3003	0.9827
18	0.0144	0.6922	0.9154	0.0587	0.9391	0.6924	0.9595
19	0.0144	0.8541	0.8531	0.1927	0.9201	0.0619	0.9408
20	0.0144	1.0819	0.7867	0.1116	0.8302	0.4276	0.9211
21	0.0144	1.0949	0.8150	0.0899	0.8548	0.5951	0.9178
22	0.0144	1.9986	0.3828	0.1446	0.3684	0.1569	0.8162
23	0.0150	1.0949	0.8175	0.0781	0.8449	0.6318	0.9037
24	0.0150	0.8541	0.8733	0.1287	0.9230	0.3052	0.9488
25	0.0150	1.0949	0.8232	0.0943	0.8557	0.4738	0.9228

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para corroborar os resultados apresentados na Tabela 6 e extrair informações adicionais, foi criado um gráfico de dispersão com o intuito de entender a influência dos parâmetros no comportamento da fragilidade financeira do modelo. Esse mecanismo pode ajudar a reforçar as observações levantadas acerca da variação dos parâmetros relatados anteriormente. A Figura 23 mostra a fragilidade média observada em cada simulação em relação à variação dos parâmetros de forma isolados.



Figura 23 – Análise de sensibilidade do modelo utilizando Monte Carlo (a) Análise da taxa básica de juros ( $\iota$ ) (b) Análise do *markup* no momento da entrada da firma no sistema ( $M_k$ )



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para avaliar o ajuste dos dados, utilizamos o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que indica o quão bem a linha de tendência se ajusta aos dados [47]. Valores próximos de 0 indicam um ajuste fraco, enquanto valores próximos de 1 indicam um bom ajuste.

Ao analisar a Figura 23.a, observa-se que o aumento da taxa básica de juros resulta em uma tendência de aumento na fragilidade financeira, já que o coeficiente de determinação encontrado foi de 0,71. Esse resultado confirma o que foi analisado através da Tabela 6. Por outro lado, a Figura 23.b mostra que a variação do valor inicial do *markup* tem uma forte influência na queda da fragilidade financeira, já que o coeficiente de determinação encontrado foi de 0,88, também corroborando com a análise realizada com a tabela anterior.

É importante destacar que, apesar da alta variabilidade dos resultados apresentados na Tabela 6, o gráfico de dispersão permite uma análise mais detalhada do comportamento dos parâmetros em relação à fragilidade financeira, possibilitando a identificação de padrões que podem ser úteis para futuras análises e tomada de decisões.

A taxa básica de juros afeta diretamente a taxa de juros que os bancos utilizam para conceder empréstimos. Quando a taxa básica de juros aumenta, as empresas tendem a ter um maior endividamento, o que afeta todo o sistema financeiro. Isso ocorre porque os bancos, ao se depararem com um aumento na taxa de juros, diminuem a oferta de crédito, criando uma barreira de entrada maior para novas empresas. Com um maior endividamento e uma menor entrada de novas empresas, o sistema financeiro tende a se tornar mais instável, uma vez que a fragilidade financeira das empresas é medida em termos do endividamento.

Por outro lado, em relação ao *markup*, o aumento de seu valor pode significar que as empresas conseguem aumentar sua lucratividade logo no início do processo, uma vez que seus preços terão um impacto positivo. Isso pode fazer com que as empresas tenham menos dívidas, contribuindo para a redução da instabilidade financeira.

Com isso, é possível entender que o sistema é sensível aos valores atribuído para a taxa básica de juros e também ao valor inicial do *markup*. Ou seja, a instabilidade financeira é impactada diretamente conforme esses parâmetros são escolhidos. Com relação ao coeficiente de determinação ( $R^2$ ), é importante ressaltar que esse valor não é uma medida absoluta de ajuste dos dados, mas sim uma medida de quanto da variação dos dados pode ser explicada pela linha de tendência. É possível que outras análises, como testes de hipóteses, sejam necessárias para confirmar ou refutar a relação de sensibilidade. Porém, essa métrica já demonstra como é o comportamento do sistema frente as variações dos parâmetros em questão, possibilitando analisar o efeito causado ao sistema ao modificar esses valores.

## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma abordagem que adiciona uma inteligência no Setor Bancário para auxiliá-los na seleção de novos projetos de empresas, por meio da utilização de uma heurística composta por aprendizado por reforço, algoritmo de colônia de formigas e do diagrama de Voronoi, utilizando o método de clusterização *K-means*. O objetivo era estudar os impactos gerados a instabilidade financeira do modelo proposto com a adição destes métodos e da chamada “auto-regulação” no setor bancário. Além disso, o trabalho verificou a implementabilidade da solução por meio da ferramenta LSD e avaliou a importância de algumas variáveis exógenas do sistema utilizando o método de Monte Carlo.

Analisando os resultados obtidos, para o objetivo geral proposto, a heurística não conseguiu impactar uma melhora da estabilidade financeira do sistema. Apesar deste fato, o modelo mostrou seguir uma linha econômica keynesiana, destacando a necessidade da adição de um novo tipo de agente no modelo que pudesse aplicar políticas para a redução da instabilidade sistêmica. A aplicação de métodos computacionais por si só, sem alinhamento com políticas econômicas e fiscais nesse novo agente, não consegue fornecer uma melhoria no sistema agregado, de tal forma que os métodos propostos beneficiaram apenas o banco e não o sistema financeiro como um todo. Os resultados vão em linha com trabalhos que tecem críticas aos acordos de Basileia, especialmente no que se refere a insuficiência do nível de exigência atual acerca da “auto-regulação” financeira. Entretanto, a heurística proposta demonstra a possibilidade de iniciar uma linha de pesquisa focada aplicação de métodos computacionais mais robustos em modelos econômicos, especialmente aqueles que utilizam abordagens baseadas em agentes.

Para o objetivo **O1** deste trabalho, foi verificado o potencial do uso da ferramenta LSD na construção e reprodução de um sistema financeiro, bem como na possibilidade de inserção de métodos computacionais mais robustos, alinhados ao modelo baseado em agentes. Como a ferramenta é baseada em C++, é possível construir códigos dinâmicos e flexíveis na linguagem. Além disso, a ferramenta demonstrou uma especial flexibilidade para adicionar análises de sensibilidade, especialmente a Monte Carlo.

No objetivo **O2**, foi possível observar que a proposta de uma heurística que acopla diferentes métodos inteligentes se mostrou uma ferramenta com potencial no que diz respeito a seleção e agrupamento de informações, especialmente aquelas que precisam de algum tipo de filtragem inicial e que necessitam do tratamento de algum tipo de vício. Fica demonstrado ainda a possibilidade da unificação da área de estudo da economia com a modelagem computacional, permitindo que novos métodos possam ser testados.

Já para o objetivo **O3** a heurística possibilitou que o sistema adotasse uma quantidade maior de firmas no decorrer do tempo, porém essas firmas não foram necessariamente

refletidas com o regime financeiro Hedge. Contudo, o fato de ter aumentado a quantidade total de firmas, demonstra que a heurística tem a capacidade de selecionar firmas de qualidade pelo menos no momento de sua entrada no sistema.

Por fim, o objetivo **O4** foi atingido com a análise de sensibilidade realizada, onde foi possível perceber que variações nos parâmetros da taxa básica de juros e no *markup* inicial das firmas fornecem grandes diferenças na instabilidade financeiro. Sendo assim, o modelo se mostrou sensível a estes parâmetros.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, espera-se adicionar novos componentes no modelo proposto bem como novos métodos computacionais para que essa linha de trabalho continue a se desenvolver. São eles:

- Adicionar um agente com o papel de governo para realizar alterações na taxa básica de juros;
- Adicionar mais bancos ao modelo para fortalecer o setor bancário;
- Propor novas heurísticas e algoritmos que possam ser acoplados em outras etapas do modelo, a fim de melhorar sua precisão na melhoria da estabilidade financeira;
- Adicionar otimização de hiper-parâmetros, como o tempo para iniciar a aplicação da heurística no modelo e a probabilidade de aplicação da heurística na avaliação de entrada de novas firmas;
- Definir políticas fiscais e econômicas visando uma distribuição mais equitativa da riqueza disponível na economia do sistema.
  - Investigar o uso de algoritmos de regressão para determinar os momentos adequados para aumentar ou diminuir a taxa de juros.

## REFERÊNCIAS

- 1 MANKIW, N. G. **Principles of economics**. [S.l.]: Cengage Learning, 2020.
- 2 BLANCHARD, O.; AMIGHINI, A.; GIAVAZZI, F. et al. **Macroeconomia: una prospettiva europea**. [S.l.]: Bologna: Il Mulino, 2014.
- 3 KEYNES, J. M. **Teoria geral do emprego, do juro e da moeda**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2017.
- 4 MINSKY, H. P. **Can It Happen Again?: Essays on Instability and Finance**. 1st. ed. New York: Routledge, 1982. xxiv+301 p. ISBN 978-1138641956.
- 5 GREENWOOD-NIMMO, M.; TARASSOW, A. A macroeconomic assessment of minsky's financial instability hypothesis. **Available at SSRN 2320964**, 2013.
- 6 GREGORIO, J. D. et al. Monetary policy and financial stability: An emerging markets perspective. **International Finance**, Wiley Blackwell, v. 13, n. 1, p. 141–156, 2010.
- 7 AL-THAQEB, S. A.; ALGHARABALI, B. G. Economic policy uncertainty: A literature review. **The Journal of Economic Asymmetries**, Elsevier, v. 20, p. e00133, 2019.
- 8 BERNANKE, B. S. **The Federal Reserve and the Financial Crisis**. 1. ed. Princeton University Press, 2015. (Economics Books, 9928-2). Disponível em: <<https://ideas.repec.org/b/pup/pbooks/9928-2.html>>.
- 9 KEYNES, J. M. **A Treatise on Probability**. [S.l.]: Macmillan International Higher Education, 1973. ISBN 978-0342939138.
- 10 KINDLEBERGER, C. P. **Manias, Pênicos e Crises: Uma História Das Crises Financeiras**. 6. ed. [S.l.]: Editora Saraiva, 2013. ISBN 9788502210806.
- 11 WILENSKY, U.; RAND, W. **An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo**. [S.l.]: MIT Press, 2015.
- 12 LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2018.
- 13 QUANLI, X.; KUN, Y.; GUILIN, W.; YULIAN, Y. Agent-based modeling and simulations of land-use and land-cover change according to ant colony optimization: a case study of the erhai lake basin, china. **Natural Hazards**, Springer, v. 75, p. 95–118, 2015.
- 14 POLYZOS, S.; SAMITAS, A.; KATSAITI, M.-S. Who is unhappy for brexit? a machine-learning, agent-based study on financial instability. **International Review of Financial Analysis**, Elsevier, v. 72, p. 101590, 2020.
- 15 BRUMAR, B. Modeling and simulation of economic processes. **Studies and Scientific Researches. Economics Edition**, n. 15, 2010.
- 16 ALRUWAILI, F. F. Artificial intelligence and multi agent based distributed ledger system for better privacy and security of electronic healthcare records. **PeerJ Computer Science**, PeerJ Inc., v. 6, p. e323, 2020.

- 17 PAULA, T. H. P. de; CROCCO, M. Financiamento e diversidade produtiva: Um modelo baseado em agentes com flutuações cíclicas emergentes. **Rev. Econ. Contemp**, v. 17, n. 1, p. 5–38, 2013.
- 18 POPKOVA, E. G.; PARAKHINA, V. N. Managing the global financial system on the basis of artificial intelligence: possibilities and limitations. In: SPRINGER. **The Future of the Global Financial System: Downfall or Harmony 6**. [S.l.], 2019. p. 939–946.
- 19 HAPPE, K. **Agent-based modelling and sensitivity analysis by experimental design and metamodelling: an application to modelling regional structural change**. [S.l.], 2005.
- 20 LIGMANN-ZIELINSKA, A.; SIEBERS, P.-O.; MAGLIOCCA, N.; PARKER, D. C.; GRIMM, V.; DU, J.; CENEK, M.; RADCHUK, V.; ARBAB, N. N.; LI, S. et al. ‘one size does not fit all’: a roadmap of purpose-driven mixed-method pathways for sensitivity analysis of agent-based models. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 23, n. 1, 2020.
- 21 FRANK, P. M.; ESLAMI, M. Introduction to system sensitivity theory. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, IEEE, v. 10, n. 6, p. 337–338, 1980.
- 22 PAULA, L. F. R. d. Comportamento dos bancos, posturas financeiras e oferta de crédito: de keynes a minsky. **Texto para discussão**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998.
- 23 HOLLAND, J. H.; MILLER, J. H. Artificial adaptive agents in economic theory. **The American economic review**, JSTOR, v. 81, n. 2, p. 365–370, 1991.
- 24 GALLEGATI, M.; GATTI, D. D.; GUILMI, C. D.; GIULIONI, G. Financial fragility, industrial dynamics and business fluctuations in an agent based model. **Industrial Dynamics and Business Fluctuations in an Agent Based Model (July 23, 2003)**, 2003.
- 25 PAULA, T. H. P. de. **Instabilidade financeira no espaço: uma abordagem monetária da dinâmica econômica regional**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2009. Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional, Faculdade de Ciências Econômicas.
- 26 PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L.; RABASCO, E. **Microeconomia**. [S.l.]: Pearson Educación, 2013.
- 27 INVESTOPEDIA. **Spread Bancário**. n.d. <<https://github.com/marcov64/Lsd>>. Acessado em: 09 de fevereiro de 2023.
- 28 CINCOTTI, S.; RABERTO, M.; TEGLIO, A. Credit money and macroeconomic instability in the agent-based model and simulator eurace. **Economics**, De Gruyter Open Access, v. 4, n. 1, 2010.
- 29 LENGNICK, M.; KRUG, S.; WOHLTMANN, H.-W. Money creation and financial instability: An agent-based credit network approach. **Economics**, De Gruyter Open Access, v. 7, n. 1, 2013.

- 30 DOSI, G.; NAPOLETANO, M.; ROVENTINI, A.; STIGLITZ, J. E.; TREIBICH, T. Rational heuristics? expectations and behaviors in evolving economies with heterogeneous interacting agents. **Economic Inquiry**, Wiley Online Library, v. 58, n. 3, p. 1487–1516, 2020.
- 31 POPOYAN, L.; NAPOLETANO, M.; ROVENTINI, A. Winter is possibly not coming: Mitigating financial instability in an agent-based model with interbank market. **Journal of Economic Dynamics and Control**, Elsevier, v. 117, p. 103937, 2020.
- 32 CATULLO, E.; GALLEGATI, M.; RUSSO, A. Forecasting in a complex environment: machine learning sales expectations in a stock flow consistent agent-based simulation model. **Journal of Economic Dynamics and Control**, Elsevier, v. 139, p. 104405, 2022.
- 33 CHEN, X.; YU, F.; ZHOU, H.; LI, Z.; WU, K.-J.; QIAN, X. Mixed production line optimization of industrialized building based on ant colony optimization algorithm. **Advances in Civil Engineering**, Hindawi, v. 2022, 2022.
- 34 PETERS, F.; NEUBERGER, D.; REINHARDT, O.; UHRMACHER, A. A basic macroeconomic agent-based model for analyzing monetary regime shifts. **Plos one**, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 17, n. 12, p. e0277615, 2022.
- 35 BICALHO, L. M.; OLIVEIRA, M. Aspectos conceituais da multidisciplinaridade e da interdisciplinaridade. **Encontros Bibli: revista eletrônica de biblioteconomia e ciência da informação**, v. 16, n. 32, p. 1–26, 2011.
- 36 ONG, M. K. **The Basel Handbook: A guide for financial practitioners**. [S.l.]: Risk books, 2007.
- 37 CARVALHO, F.; PAULA, L. F. D.; SICSU, J. **Economia Monetária e Financeira: Teoria e Política**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. ISBN 978-85-352-2360-6.
- 38 TEFATSION, L. Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory. **Handbook of computational economics**, Elsevier, v. 2, p. 831–880, 2006.
- 39 AXELROD, R. The complexity of cooperation: Agent-based models of competition and collaboration. In: **The Complexity of Cooperation**. [S.l.]: Princeton university press, 1997.
- 40 CICOGNA, M. P. V. **Modelos baseados em agentes na solução de problemas econômicos em concorrência imperfeita**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014.
- 41 TEIXEIRA, J. **O que é inteligência artificial**. [S.l.]: E-Galáxia, 2019.
- 42 RAILSBACK, S. F.; GRIMM, V. **Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction**. [S.l.]: Princeton University Press, 2011.
- 43 VALENTE, M. **Laboratory for simulation development: Lsd**. [S.l.], 2008.

- 44 VALENTE, M.; ANDERSEN, E. S. et al. A hands-on approach to evolutionary simulation: Nelson and winter models in the laboratory for simulation development. **Electronic Journal of Evolutionary Modeling and Economic Dynamics**, v. 1, n. 1, p. 1–45, 2002.
- 45 TISUE, S.; WILENSKY, U. Netlogo: A simple environment for modeling complexity. In: BOSTON, MA. **International conference on complex systems**. [S.l.], 2004. v. 21, p. 16–21.
- 46 SUTTON, R. S.; BARTO, A. G. **Reinforcement learning: An introduction**. [S.l.]: MIT press, 2018. (Adaptive Computation and Machine Learning). ISBN 978-0262193986.
- 47 GÉRON, A. **Hands-on machine learning with Scikit-Learn and TensorFlow: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems**. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2017.
- 48 GALATZER-LEVY, I. R.; RUGGLES, K. V.; CHEN, Z. Data science in the research domain criteria era: relevance of machine learning to the study of stress pathology, recovery, and resilience. **Chronic Stress**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 2, p. 2470547017747553, 2018.
- 49 YANG, X.-S. **Nature-inspired optimization algorithms**. [S.l.]: Academic Press, 2020.
- 50 COUZIN, I. D. Collective cognition in animal groups. **Trends in cognitive sciences**, American Association for the Advancement of Science, v. 309, n. 5732, p. 648–652, 2005.
- 51 ZBIGNIEW, M. Genetic algorithms+ data structures= evolution programs. In: **Computational Statistics**. [S.l.]: Springer-Verlag, 1996. p. 372–373.
- 52 KUDITHIPUDI, D. Perceptron and backpropagation: Evolution and trends. **International Journal of Computer Applications**, v. 114, n. 14, p. 43–48, 2015.
- 53 PASSINO, K. M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. **IEEE control systems magazine**, IEEE, v. 22, n. 3, p. 52–67, 2002.
- 54 GARNIER, S.; GAUTRAIS, J.; THERAULAZ, G. From local interactions to global tasks: An overview of models and experiments on collective problem solving by social insects. **Journal of theoretical biology**, Elsevier, v. 244, n. 1, p. 59–71, 2007.
- 55 DORIGO, M.; BIRATTARI, M. Ant colony optimization. **Scholarpedia**, v. 2, n. 11, p. 1432, 2007.
- 56 CAMACHO, D.; COELLO, C. A. A survey of algorithm selection techniques for multi-objective optimization problems. In: \_\_\_\_\_. **Evolutionary Multi-Criterion Optimization**. [S.l.]: Springer, 2007. p. 431–481.
- 57 LIU, Y.; CAO, B.; LI, H. Improving ant colony optimization algorithm with epsilon greedy and levy flight. **Complex & Intelligent Systems**, Springer, v. 7, n. 4, p. 1711–1722, 2021.

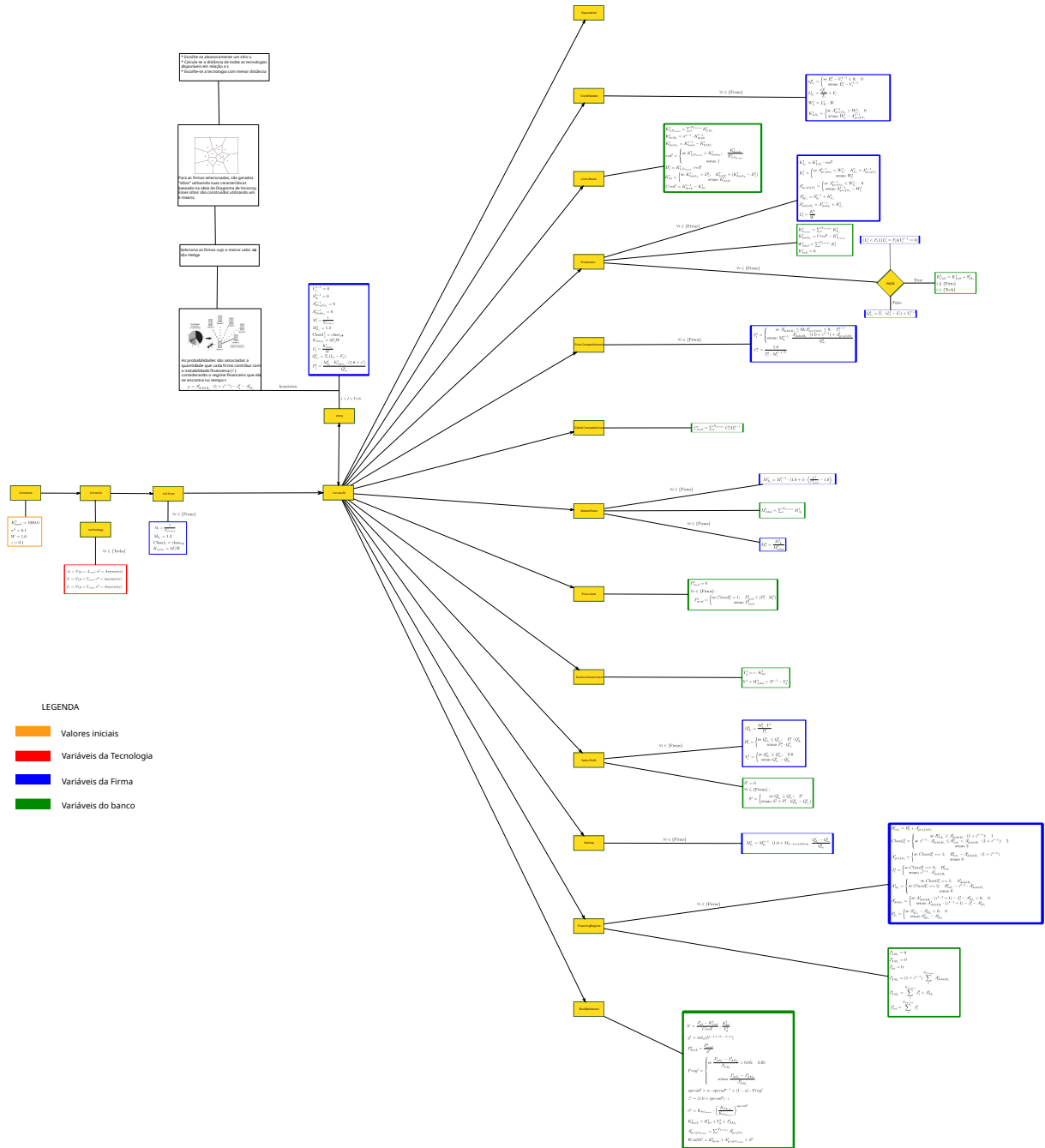


- 58 GARNIER, S.; GAUTRAIS, J.; THERAULAZ, G. The biological principles of swarm intelligence. **Swarm intelligence**, Springer, v. 1, n. 1, p. 3–31, 2007.
- 59 PREPARATA, F. P.; SHAMOS, M. I. Computational geometry. texts and monographs in computer science. **Berlin, Springer-Verlag**, 1985.
- 60 ERWIG, M. The graph voronoi diagram with applications. **Networks: An International Journal**, Wiley Online Library, v. 36, n. 3, p. 156–163, 2000.
- 61 AURENHAMMER, F. Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, ACM New York, NY, USA, v. 23, n. 3, p. 345–405, 1991.
- 62 PREPARATA, F. P.; SHAMOS, M. I. **Computational geometry: an introduction**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- 63 REDDY, D.; JANA, P. K. Initialization for k-means clustering using voronoi diagram. **Procedia Technology**, v. 4, p. 395–400, 2012. ISSN 2212-0173. 2nd International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology( C3IT-2012) on February 25 - 26, 2012.
- 64 GRUS, J. **Data Science from Scratch: First Principles with Python**. [S.l.]: " O'Reilly Media, Inc.", 2015.
- 65 ALPAYDIN, E. **Introduction to machine learning**. [S.l.]: MIT press, 2009.
- 66 ROUSSEEUW, P. J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of computational and applied mathematics**, Elsevier, v. 20, p. 53–65, 1987.
- 67 HAN, J.; PEI, J.; KAMBER, M. **Data mining: concepts and techniques**. [S.l.]: Elsevier, 2011.
- 68 ROKACH, L.; MAIMON, O. Clustering methods. In: **Data mining and knowledge discovery handbook**. [S.l.]: Springer, 2005. p. 321–352.
- 69 HAMBY, D. M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. **Environmental monitoring and assessment**, Springer, v. 32, n. 2, p. 135–154, 1994.
- 70 BLAKE, J. T.; REIBMAN, A. L.; TRIVEDI, K. S. Sensitivity analysis of reliability and performability measures for multiprocessor systems. In: **Proceedings of the 1988 ACM SIGMETRICS conference on Measurement and modeling of computer systems**. [S.l.: s.n.], 1988. p. 177–186.
- 71 GOMES, C. F. S.; COSTA, H. G.; BARROS, A. P. de. Sensibility analysis of meda using prospective in brazilian energy sector. **Journal of Modelling in Management**, Emerald Publishing Limited, 2017.
- 72 FREY, H. C.; PATIL, S. R. Identification and review of sensitivity analysis methods. **Risk analysis**, Wiley Online Library, v. 22, n. 3, p. 553–578, 2002.
- 73 SALTELLI, A.; CHAN, K.; SCOTT, E. M. (Ed.). **Sensitivity Analysis**. 1st. ed. [S.l.]: Wiley, 2009. 504 p. (Wiley Paperback Series). European Comission, Joint Research Centre, Italy. University of Glasgow, UK. ISBN 0470743824, 978-0470743829.

- 74 MACKAY, D. J. C. Introduction to monte carlo methods. In: **Learning in graphical models**. [S.l.]: Springer, 1998. p. 175–204.
- 75 GONÇALVES, G.; TEIXEIRA, L.; KALID, R. d. A. Análise da sensibilidade do método de monte carlo para a estimativa de incerteza de acordo com o número de dados aleatórios gerados. 2009.
- 76 MINSKY, H. P.; KAUFMAN, H. **Stabilizing an unstable economy**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2008. v. 1.
- 77 RUIZ, R. M. **Growing regions from the bottom up: regional economies as a self-organizing system**. [S.l.]: New School University, 2004.
- 78 BRIGHAM, E. F.; HOUSTON, J. F. **Fundamentos da moderna administração financeira**. [S.l.]: Bookman Editora, 2013.
- 79 SILVERBERG, G.; DOSI, G.; ORSENIGO, L. Innovation, diversity and diffusion: a self-organisation model. **The Economic Journal**, Oxford University Press Oxford, UK, v. 98, n. 393, p. 1032–1054, 1988.
- 80 PORTERMICHAEL, E. **On Competition, Updated and Expanded Edition**. [S.l.]: Harvard Business Press Books, 2008.
- 81 SHEN, Q. A dynamic model of entry and exit in a growing industry. **Marketing Science**, INFORMS, v. 33, n. 5, p. 712–724, 2014.
- 82 MENDONÇA, A. R. R. d.; PRUDENCIAL, R.; PROTEÇÃO, R. de. Regulação bancária e arranjo institucional pós-crise: atuação do conselho de estabilidade financeira e basileia iii. **CINTRA, MAM & GOMES, K. da R. As transformações do sistema financeiro internacional**, p. 441–478, 2012.
- 83 VALENTE, M. **Lsd v8.0**. 2022.  
<<https://github.com/marcov64/Lsd/tree/8.0-stable>>. Acessado em 20 de janeiro de 2023.
- 84 YUAN, Y.; MACKINNON, D. P. Robust mediation analysis based on median regression. **Psychological Methods**, American Psychological Association, v. 19, n. 1, p. 1, 2014.
- 85 WILENSKY, U. **NetLogo (versão 3.1.5)**. 2007.  
<<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/index.shtml>>. Acessado em 20 de janeiro de 2023.
- 86 JUAN, A. A.; KEENAN, P.; MARTÍ, R.; MCGARRAGHY, S.; PANADERO, J.; CARROLL, P.; OLIVA, D. A review of the role of heuristics in stochastic optimisation: from metaheuristics to learnheuristics. **Annals of Operations Research**, Springer, p. 1–31, 2021.
- 87 GANDOMI, A. H.; YANG, X.-S.; TALATAHARI, S.; ALAVI, A. H. Metaheuristic algorithms in modeling and optimization. **Metaheuristic applications in structures and infrastructures**, Elsevier Amsterdam, The Netherlands, v. 1, 2013.
- 88 LEITE, K. V.; REIS, M. O acordo de capitais de basileia iii: Mais do mesmo? **Revista EconomiA**, v. 14, n. 1A, p. 159–87, 2013.

## APÊNDICE A – FLUXO DE ATRIBUIÇÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO

Figura 24 – Fluxo de execução do modelo, detalhando as chamadas para atribuição de cada uma das variáveis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023). Disponível em <<https://www.github.com>>