

Documento de Trabalho

Nº 002/2022

Modelagem baseada em agentes aplicada ao antitruste

José Bruno do Nascimento Clementino
(Estagiário da CECAN/DEE)

Brasília, julho de 2022



Ministério da Justiça e Segurança Pública
Conselho Administrativo de Defesa Econômica

Modelagem baseada em agentes aplicada ao antitruste

Departamento de Estudos Econômicos – DEE

SEPN 515 Conjunto D, Lote 4, Ed. Carlos Taurisano

Cep: 70770-504 – Brasília-DF

www.gov.br/cade

ISSN 2764-1031

Esse documento foi produzido pelo Departamento de Estudos Econômicos do Conselho Administrativo de Defesa Econômica.

José Bruno do Nascimento Clementino

(Estagiário do CECAN/DEE)

As opiniões expressadas em Documentos de Trabalho são de responsabilidade dos autores. Elas não têm como propósito refletir opiniões e visões do Conselho Administrativo da Defesa Econômica ou do Ministério da Justiça.

Para reproduzir o documento mesmo que parcialmente, você deve citá-lo.

Sumário executivo

Este trabalho tem como objetivo apresentar a modelagem baseada em agentes e tratar de aplicações realizadas por outros autores na área de organização industrial.

Um modelo baseado em agentes considera a menor parte do sistema como objetos a serem modelados; a modelagem considera que os padrões observados num sistema econômico, por exemplo, são fruto da interação dos indivíduos que o compõem. Assim sendo, o trabalho aborda, numa primeira parte, os seguintes tópicos:

- As características da metodologia em si;
- Vantagens e desvantagens;
- Principais aplicações;
- Protocolos para a construção de modelos.

Todos os tópicos abordados tratarão do que já foi discutido pela literatura na área, tanto do ponto de vista da ecologia, considerando Railsback e Grimm (2019), quanto pela economia computacional baseada em agentes, que leva em conta os estudos de Tesfatsion (2006) e Tesfatsion (2021).

A segunda parte do trabalho trata das aplicações da metodologia em trabalhos de organização industrial. Em geral, observa-se quantidade limitada de trabalhos relacionados na literatura. Por outro lado, observa-se uma grande quantidade de trabalhos, que não são esgotados ao longo das descrições realizadas neste trabalho, que tratam de dinâmica industrial, área em que a ABM possui vantagens dadas as suas características.

Palavras-chave: modelagem baseada em agentes, organização industrial, métodos computacionais em economia

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. MODELAGEM BASEADA EM AGENTES.....	6
2.1. O que é a modelagem baseada em agentes?	7
2.2. Usos da metodologia	8
2.3. Vantagens e desvantagens.....	10
2.4. Construindo modelos	11
2.4.1. Modelagem generativa	11
2.4.2. Exploração de teorias	14
2.5. Descrevendo e documentando modelos	15
2.5.1. Overview, Design Concepts and Details (ODD)	15
2.5.2. Transparent and Comprehensive model Evaluation (TRACE)	18
3. ABM E ORGANIZAÇÃO INDUSTRIAL.....	19
3.1. Aprendizagem.....	20
3.2. Modelagem de mercados específicos.....	23
3.2.1. Bens duráveis.....	23
3.2.2. Varejo de Gasolina.....	24
3.2.3. Energia Elétrica	27
3.2.4. Indústria de Computadores.....	28
3.2.5. Indústria de Petróleo.....	29
3.3. Cartéis	30
4. CONCLUSÃO	34
BIBLIOGRAFIA	35

1. INTRODUÇÃO

A organização industrial estuda o funcionamento de mercados. Dentro dessa área de estudo, assuntos variados são abordados, com um enfoque especial em comportamento estratégico por parte das empresas participantes de um mercado estudado. Suas decisões estratégicas são concernentes à determinação de quantidades e preços de produtos transacionados. Os mercados podem ser formados por empresas de diferentes características econômicas, como o tamanho, descrito, por exemplo, pelo número de funcionários ou receitas obtidas, além, é claro, das estratégias tomadas em decorrência de suas posições de mercado e disponibilidade de informação.

Essa heterogeneidade de agentes permite e motiva a utilização de metodologias alternativas para melhor compreender os fenômenos observados. Uma dessas alternativas é a modelagem baseada em agentes (ou Agent-Based Modeling, em inglês, cujo acrônimo é ABM). A metodologia permite que um sistema qualquer seja descrito pelas menores partes que o compõem e, em decorrência de sua autonomia, o determinam. Essas características fazem com que um mercado seja modelado considerando empresas e consumidores, além de processos que funcionam como explicações candidatas para explicar a determinação de preços, de quantidades e a evolução de indústrias.

O trabalho em questão explica, de maneira resumida, a ABM, tratando de suas características, usos, vantagens e desvantagens e delinea alguns protocolos que ajudam a pautar a construção de modelos que utilizam essa abordagem, temas que serão tratados no segundo capítulo. Após delinear a metodologia, alguns trabalhos que tratam de organização industrial são brevemente apresentados e discutidos. Com essa pequena contribuição, busca-se dar um panorama geral a respeito dos objetivos de pesquisa pretendidos pelos autores que utilizam a metodologia em seus estudos.

2. MODELAGEM BASEADA EM AGENTES

Antes de tudo, é preciso saber do que se trata a metodologia que se propõe utilizar para melhor entender fenômenos econômicos. Esta seção, então, trata de avaliar as características de um modelo baseado em agentes, buscando explicar do que se trata a metodologia, algumas de suas aplicações mais gerais, suas principais vantagens e desvantagens e sugerir como

modelos devem ser estruturados, em especial modelos que se tratam de geração de fatos estilizados (modelagem denominada como generativa) e de modelos que buscam explorar e testar teorias.

2.1. O que é a modelagem baseada em agentes?

A modelagem baseada em agentes é uma metodologia que busca descrever um sistema de qualquer natureza quando se compreende que é preciso representar explicitamente os indivíduos que o compõem e seus respectivos comportamentos individuais (RAILSBACK E GRIMM, p.19). Como observado por Tesfatsion (2006), os indivíduos, denominados agentes, são meros conjuntos de dados e métodos comportamentais que são parte constituinte de um mundo construído computacionalmente. Em modelos construídos de modo a representar sistemas econômicos, agentes podem representar trabalhadores, famílias, empresas, mercados, florestas e até mesmo infraestrutura. Ou seja, agentes podem representar desde entes tomadores de decisão até mesmo características passivas que estão presentes no mundo e não possuem nenhum tipo de função cognitiva.

A metodologia consiste em construir computacionalmente sistemas com agentes capazes de interagir entre si e depois, por meio de simulações, avaliar fenômenos que venham a emergir em decorrência das interações desses agentes. Os modelos que utilizam a metodologia são construídos de maneira que evoluam sem influência direta daquele que o constrói, ou seja, os fenômenos que surgem das interações são puramente endógenos. É válido ressaltar que a modelagem baseada em agentes não é uma metodologia que tem como objetivo substituir abordagens que utilizam métodos matemáticos ou estatísticos. Tesfatsion (2006) argumenta que a ABM, dentro das ciências econômicas, serve principalmente para auxiliar na avaliação de teorias, por exemplo ao se construir um modelo com base na teoria e relaxar algumas de suas suposições (hipóteses?).

As principais características de um modelo baseado em agentes, de acordo com Epstein (1999), são:

1. a *autonomia* dos agentes que compõem o modelo, ideia diretamente relacionada a completude dinâmica. Os agentes respondem a estímulos presentes no modelo;

2. os agentes podem conduzir seus processos num espaço *explicitamente definido*, ou seja, os modelos podem tratar de interações que ocorrem num dado espaço, e as ações desses agentes podem ser determinadas pelas características do espaço em que estão inseridos;
3. dada a condição espacial, alguns modelos podem incluir *interações locais* (numa dada vizinhança ou num raio de interação), que são responsáveis pelo surgimento de regularidades globais;
4. os agentes possuem *racionalidade limitada*, porque não possuem conhecimento sobre recompensas futuras atribuídas às suas ações tampouco conhecem os riscos envolvidos. Agentes estão reagindo ao ambiente e aos seus vizinhos ao tomarem decisões e, possivelmente, se adaptam conforme o tempo passa.

A próxima subseção trata de possíveis usos para a metodologia, como as classes de estudo em que ela é tipicamente utilizada.

2.2. Usos da metodologia

Uma questão que pode surgir é: qual tipo de estudo é conduzido por quem emprega uso da metodologia? Tesfatsion (2006) cataloga os estudos de economia computacional baseada em agentes (ACE) da seguinte maneira:

- Generativos: estudos que buscam reproduzir *regularidades empíricas* (ou fatos estilizados).
- Compreensão normativa: serve para melhor compreender os efeitos de uma mudança nos desenhos institucionais de um sistema, por exemplo, mudanças em leis, processos de produção, políticas econômicas e instituições.
- Geração de teorias: consiste no exame de comportamentos dinâmicos de sistema sob diferentes condições iniciais.
- Avanços metodológicos: o objetivo desse tipo de estudo é desenvolver uma estrutura adequada para que experimentos que utilizem a metodologia sejam

considerados como válidos, além de permitir que sejam explorados de maneira inovadora.

O estudo generativo, que busca reproduzir uma regularidade empírica, funciona como uma explicação candidata para o fenômeno estudado. O processo de validação desse tipo de estudo, de acordo com Tesfatsion (2021), dependerá dos atributos iniciais dos agentes que compõem o sistema, das ações que esses agentes podem realizar, da aproximação dos dados gerados pelo modelo com os dados ou padrões observados e, até mesmo, da capacidade do modelo realizar previsões a respeito do fenômeno.

Com relação aos estudos de compreensão normativa, o processo “*é similar a encher um balde para determinar se ele transbordará*” (TESFATSION, 2021, p.5, tradução nossa). Nesse tipo de estudo, o autor constrói um mundo virtual que captura as características do sistema que ele busca modelar e altera parte do construto, de modo a contemplar as mudanças propostas, por exemplo, por uma política pública. No momento de realização do estudo, múltiplos parâmetros devem ser inicializados, seus resultados são coletados e depois são comparados a um mundo sem modificações, visando avaliar os impactos da política proposta.

Tratando-se da geração de teorias, o modelo baseado em agentes pode ser utilizado para entender o comportamento futuro de um sistema econômico. Quando se avalia um mesmo sistema sob diferentes parâmetros de inicialização, é plausível que diferentes trajetórias e desenvolvimentos de sistema sejam contemplados. Os dados gerados podem ser utilizados para a construção de aproximações de retratos de fase¹, permitindo que possíveis equilíbrios de sistema sejam identificados e, também, permitindo que o autor consiga avaliar estados de sistema que podem ser considerados viáveis, além dos que já são observados empiricamente.

O último tipo de estudo, que trata de avanços metodológicos, é autoexplicativo: sua motivação é a necessidade de se encontrar metodologias e ferramentas viáveis para que dados gerados através de, por exemplo, análises de sensibilidade sejam comparados aos dados do mundo real.

¹ Retratos de fase são representações das trajetórias de um sistema dinâmico em um plano de fases. Em geral, essas figuras descrevem o comportamento de variáveis de estado e podem indicar a estabilidade (ou possíveis equilíbrios) de um sistema a depender da combinação de valores das variáveis do plano.

O uso da metodologia para os trabalhos de classe mencionada implica vantagens sobre outras técnicas mais populares. A metodologia possui também desvantagens, que não podem deixar de serem mencionadas. A subseção seguinte trata desse tema.

2.3. Vantagens e desvantagens

Afinal, por que empregar essa metodologia? A principal vantagem é a possibilidade de se representar diferentes agentes com objetivos distintos e também a possibilidade de que esses agentes interajam entre si, enquanto perseguem interesses individuais. Além disso, os modelos podem levar em conta agentes multidimensionais e, até mesmo, evolutivos, no sentido de que não só algumas de suas características ou atributos são modelados, mas o agente modelado poderá também alterar a maneira como interage com o sistema enquanto o tempo progride: o processo de aprendizagem pode ser explicitamente incluído no sistema. Heterogeneidade e adaptabilidade são características importantes e além dessas, outros elementos que compõem variados tipos de agentes podem ser modelados, como o grau de racionalidade e suas capacidades sensoriais.

Tesfatsion (2006) reconhece que a principal desvantagem desse tipo de modelo vem da necessidade que seja *dinamicamente completo*. Em termos simples, a partir do momento no qual um modelo é inicializado, esse deve ser capaz de se desenvolver ao longo do tempo sem que o modelador interaja com ele. Nesse caso, especificações iniciais de um modelo, bem como as características e pré-disposições de agentes, que podem ser representados, por exemplo, com modelos de decisão, precisam ser estabelecidos. No entanto, pode-se argumentar que essa acaba sendo uma vantagem, porque o responsável por modelar um sistema precisa compreender o objeto que busca modelar de modo que sua construção não dependa de choques exógenos como motivadores das dinâmicas de sistema. Dessa maneira, as características incluídas no modelo, os processos, responsáveis por determinar a independência e persistência do mesmo, funcionam como hipóteses auxiliam na explicação do sistema modelado.

Como especificações iniciais, tais quais atributos de agentes e valores que determinam a importância relativa dos processos realizados por eles, precisam ser determinadas, é necessário que um modelo seja avaliado em uma vasta combinação de parâmetros distintos

(e plausíveis para o estudo), já que a menor das perturbações nesses parâmetros iniciais de sistema pode induzir a resultados completamente diferentes dos obtidos com outros parâmetros. No entanto, com a evolução das tecnologias que são utilizadas para simulação de modelos, esse se torna o menor dos problemas, já que, a depender da complexidade do modelo, milhares de simulações podem ser realizadas em pouco tempo².

Uma outra desvantagem desse tipo de modelo é a que as distribuições de resultados obtidos por meio de simulações podem ser multimodais, sugerindo que um sistema pode ter múltiplos equilíbrios mesmo para uma combinação específica de parâmetros. O desafio, então, é confrontar os dados obtidos dessas simulações com o processo gerador de dados (pouco conhecido) advindo do mundo real. Por mais que o modelo baseado em agentes seja capaz de contemplar o processo gerador desconhecido, é possível que, dentre a gama de resultados possíveis, a probabilidade de algo que tenha de fato acontecido seja pequena diante de todas as outras possibilidades geradas.

2.4. Construindo modelos

Um dos principais desafios é determinar como um modelo baseado em agentes deve ser desenvolvido. Se o objeto a ser modelado é complexo, com diversas interações e múltiplos agentes que determinam o estado de um dado sistema, como escolher quais dessas características devem ser incluídas no modelo? Railsback e Grimm (2019) argumentam que o bom modelo é aquele considerado estruturalmente realístico: tal modelo não deve incluir todas as características observáveis no mundo real, mas deve incluir estruturas, como famílias ou mercados, e processos, como as interações realizadas pelos agentes presentes, responsáveis por reproduzir os fenômenos observados de um dado sistema.

2.4.1. Modelagem generativa

Se o objetivo for desenvolver um trabalho do tipo *generativo*, Grimm e Railsback (2005) e Railsback e Grimm (2019) propõem uma estrutura para a construção de estudos: a

² Muitos trabalhos realizados utilizam dezenas de simulações por combinação de parâmetros.

modelagem orientada a padrões³. Em suma, os autores sugerem que o ciclo de construção de modelos ocorra da seguinte maneira:

1. Determinação de padrões, regularidades empíricas ou fatos estilizados;
2. Encontrar modelos de decisão para a representação de agentes e suas tomadas de decisão;
3. Construção de um modelo baseado em agentes;
4. Questionamento: o modelo consegue, de maneira satisfatória, reproduzir os padrões pretendidos?

Mencionam-se padrões no plural, porque a estrutura leva em conta a necessidade de se validar múltiplos padrões observáveis num estudo. Dessa maneira, cada um dos padrões serve como um filtro. O modelo capaz de reproduzir uma grande quantidade de padrões é considerado mais “estruturalmente realístico”. No entanto, identificar esses padrões se mostra um desafio, porque demanda que o modelador tenha conhecimento relevante a respeito não só do sistema que ele busca modelar, mas de processos que levam ao padrão observado.

É nesse contexto que o modelo baseado em agentes funciona, também, como uma espécie de laboratório virtual. Se um processo é incluído num modelo qualquer, mas o mesmo não leva a reprodução de um padrão, ele é removido do modelo. Por essa razão, é preciso levar em conta um conjunto de processos que englobem elementos que 1) já tenham sido propostos para determinar o comportamento dos componentes de um sistema; e 2) processos alternativos advindos de teorias ou dados empíricos. E, mesmo que um processo seja capaz de reproduzir um padrão, o ciclo de modelagem não é necessariamente interrompido. Os autores apontam a necessidade de se continuar aprimorando um modelo, postulando novos processos responsáveis pela reprodução de padrões observados, acompanhado de testes.

O processo de *parametrização* é um dos passos necessários para a construção de um modelo baseado em agentes. De certo modo, ela é responsável por determinar a importância

³ Os autores explicam que padrões e fatos estilizados são conceitos intercambiáveis.

relativa dos processos dentro de um modelo. O passo consiste na escolha de valores que determinam os parâmetros de processos escolhidos para modelar um sistema (RAILSBACK E GRIMM, 2019, p. 263). Considerando um exemplo bastante simples, num modelo em que agentes se encontram numa feira e possuem uma lista de compras, desenvolvido por Hamill e Gilbert (2015), o número de itens na lista é um parâmetro.

Idealmente, levando em conta que um modelo contém múltiplos processos responsáveis pelo todo, cada modelo deve ser parametrizado individualmente, ou, por vezes, a escolha dos parâmetros pode ser determinada com base em trabalhos publicados. Na modelagem generativa, ocorre um tipo especial de parametrização denominada *calibração*. Busca-se, nesse caso, determinar o valor dos parâmetros de modo que os dados gerados pelo modelo se adequem, com base em algum critério previamente definido⁴, aos dados empíricos.

Considerando um modelo generativo, a partir do momento em que é definido e se observa que é capaz de reproduzir padrões pretendidos, ainda é possível que o mesmo esteja realizando o feito pelo motivo errado – um conjunto de processos improváveis, que determinam a evolução do sistema modelado, podem, em combinação, reproduzir padrões desejados, porque os valores dos parâmetros escolhidos podem estar errados⁵. Como garantir, então, que o modelo desenvolvido não está reproduzindo padrões pelos motivos errados? Como realizar sua *validação*? Uma sugestão proposta por Railsback e Grimm (2019) é separar amostras de dados de modo que uma parte seja utilizada para calibrar o modelo, enquanto a outra parte seja utilizada para validá-lo.

⁴ O critério pode ser determinado por categorias, separadas em aceitáveis ou não, ou por melhor ajuste. Quando se trata de reproduzir alguma série de tempo utilizando o modelo em questão, o erro quadrático médio pode ser uma escolha de critério de ajuste. Quando há um grande número de parâmetros para serem calibrados, outras metodologias podem ser empregadas, como a computação bayesiana aproximada (ABC), máxima verossimilhança e regressões lineares. Um trabalho que utiliza a ABC para a estimação de parâmetros é o de Lagarrigues et al. (2015). O trabalho de Carrel et al. (2020) compara ABC com regressões regularizadas.

⁵ Ou ainda, devido a um grande número de parâmetros calibrados, é possível que o modelo esteja sob efeito de um sobreajuste.

2.4.2. Exploração de teorias

Para o caso da exploração de teorias ou mesmo da criação de novas teorias, Tesfatsion (2006) sugere uma abordagem construtiva para a implementação de modelos que representem sistemas econômicos. A seguinte sequência de passos é postulada pela autora:

1. Escolha de um modelo da literatura que esteja representado de maneira completa e acessível com o objetivo de servir como parâmetro de comparação;
2. Remoção completa de suposições que imponham externamente condições de equilíbrio (por exemplo, a suposição de que mercados se equilibram por meio de preços);
3. Modelo *dinamicamente completo*, ou seja, o modelo precisa ser movido puramente pelas interações dos indivíduos representados no sistema;
4. Definição de uma condição de “equilíbrio”⁶.

Perceba que o ciclo proposto pela autora não é tão distante do proposto por Railsback e Grimm (2019). Escolher um modelo da literatura serve para determinar os padrões a serem reproduzidos. Ao remover uma suposição e incluir processos que tornem o modelo dinamicamente completo, o objetivo é verificar se o modelo baseado em agentes é capaz de reproduzir de fato o trabalho em questão, novamente, como uma espécie de laboratório⁷. Caso não seja, ganha-se informação qualitativa a respeito do porquê o modelo não reproduz de maneira eficaz os padrões sob a ausência de uma suposição importante. Uma janela de oportunidade se abre para buscar processos que sejam capazes de reproduzir, mesmo com a ausência de uma suposição importante, o padrão em questão.

Modelos baseados em agentes são construídos utilizando linguagens de programação. Tipicamente, linguagens que dão suporte ao paradigma de programação orientada a objetos

⁶ Alguns modelos não vão, de fato, possuir um equilíbrio, no sentido de que mudarão de estado ou progredirão de maneira indefinida, porém, alguns modelos podem utilizar alguma variável de estado e estabilização dessa variável como critério de equilíbrio. Por exemplo, suponha um modelo baseado em agentes no qual firmas são representadas por agentes e essas firmas competem por preços, a estabilidade dos preços praticados por esses agentes ao longo de um determinado período pode ser uma possível condição de estabilidade ou equilíbrio.

⁷ O processo de transformar um modelo analítico num modelo baseado em agentes por meio da adaptação de suas hipóteses também é denominado “agentização”.

(OOP) são utilizadas, como Python ou Java⁸. Além da possibilidade de se utilizar linguagens de programação de propósito geral, existem ambientes dedicados, como a linguagem de programação Netlogo.

2.5. Descrevendo e documentando modelos

Porque modelos baseados em agentes são desenvolvidos programaticamente e em diferentes plataformas, a replicação adequada de um trabalho desenvolvido por outros autores pode ser difícil quando o código de um modelo não é compartilhado. Em geral, as descrições do funcionamento dos modelos, suas teorias e as premissas são compartilhadas em trabalhos científicos, mas outros elementos importantes que facilitam a reimplementação de modelos por parte de outros autores podem não ser. Para auxiliar na uniformidade de trabalhos desenvolvidos na área, protocolos como o Overview, Design Concepts and Details (ODD) foram desenvolvidos e são utilizados por alguns autores. Nesta subseção vamos descrever brevemente o protocolo ODD, que é utilizado para a formulação e descrição de modelos.

2.5.1. Overview, Design Concepts and Details (ODD)

O ODD surgiu inicialmente como protocolo cujo objetivo era a padronização da maneira pela qual modelos baseados em agentes eram expostos, levando a uma melhor compreensão dos modelos desenvolvidos e facilitando a comunicação dos mesmos (GRIMM et al., 2006, p. 116-117). No protocolo, as características de modelo baseado em agentes são descritas de maneira factual e divididas em três partes distintas que dão nome ao protocolo: visão global (overview), conceitos de design (design concepts) e detalhes (details). Cada parte é composta por outras partes menores cujo objetivo é responder perguntas relacionadas ao modelo, estas formam uma lista de controle que descreve os pontos considerados chave na explicação de um modelo, além de auxiliar autores na inclusão de características em seus modelos de maneira consciente e deixar leitores cientes das decisões tomadas por autores (GRIMM et al. 2010, p. 2760).

⁸ Uma leitura sugerida a respeito do tema é Weisfeld (2013). Existem pacotes dedicados para a implementação de modelos baseados em agentes, tornando mais fácil o processo de definição desses agentes e o processo de coleta de dados. Na linguagem de programação Python, dois exemplos são as bibliotecas AgentPy e Mesa.

O protocolo está descrito em diferentes trabalhos com maior ou menor grau de detalhamento entre versões. Iterações mais recentes possuem algumas mudanças de modo a incluir melhorias e algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos mais elaborados. Alguns dos trabalhos em questão são Grimm et al. (2006), Grimm et al. (2010), Railsback and Grimm (2019) e Grimm et al. (2020). Abaixo alguns dos elementos que compõem o protocolo são destacados, mas os elementos que podem compor a descrição de um trabalho não são apresentados em toda sua completude Sugere-se ao leitor que deseja aprofundar-se a leitura dos trabalhos realizados pelos autores citados.

A seção de visão global trata de descrever o funcionamento geral de um modelo baseado em agentes e é dividida em três partes:

- *Propósito e padrões*: a subseção se trata da descrição, em uma frase, do propósito geral de um modelo, explicitando qual o sistema que está sendo representado e, por consequência, delimitando quais são os elementos que devem fazer parte do modelo desenvolvido.
- *Entidades, variáveis de estado e escalas*: subseção que descreve quais são as entidades representadas por um modelo, podendo ser pessoas, empresas ou instituições; além de descrever as características que as diferenciam, como o sexo, idade ou receita, ou seja, quais são suas variáveis de estado. Outra característica descrita nessa subseção trata da escala de tempo e espaço em que se dá o modelo, se o modelo se desenvolve no curso de dias ou horas; se a distância entre entidades, se é representada, é dada por quilômetros ou centímetros.
- *Visão geral do processo e programação*: nesta parte, descreve-se a dinâmica de um modelo, tratando de detalhar quais são os mecanismos internos responsáveis pela alteração das variáveis de estado das entidades representadas e a ordem que esses mecanismos ocorrem.

Na seção de *conceitos de design*, elementos que não podem ser tipicamente descritos com a utilização de modelos são tratados. As perguntas respondidas nessa seção tratam de uma grande variedade de elementos que descrevem as características do modelo:

1. Quais as teorias e hipóteses que determinam o modelo e como elas são incorporadas em seu design?
2. Existem fenômenos emergentes que decorrem da interação das entidades que fazem parte do modelo?
3. Os agentes representados no sistema possuem comportamento adaptativo? Quais decisões são tomadas por esses agentes?
4. Os agentes são capazes de aprender de acordo com as decisões tomadas? Se sim, como?
5. Existem processos estocásticos usados no modelo? Por quê?
6. Quais informações são extraídas das simulações e analisadas?

Essas são apenas algumas das perguntas que o autor de um modelo deve responder ao desenvolver a descrição de um modelo baseado em agentes, mas outras questões que tratam de como a sensibilidade, previsão e interação são realizadas por agentes devem ser incluídas na descrição caso estejam presentes num modelo.

A terceira parte, que trata de *detalhes*, destaca as características de inicialização de um modelo, o seu estado inicial, de modo a garantir a reprodutibilidade dos resultados obtidos numa análise. Além disso, alguns modelos utilizam dados externos para o seu funcionamento e isso deve ser destacado caso ocorra num modelo desenvolvido. Por fim, os submodelos, que são os modelos dos processos presentes dentro de um modelo baseado em agentes, devem ser descritos na seção que trata dos detalhes dos modelos.

Com o seu nível de detalhamento e a formalização da descrição de um trabalho, o protocolo auxilia na uniformização dos trabalhos que utilizam a metodologia baseada em agentes. Em trabalho mais recente, Grimm et al. (2020) argumentam que, graças a sua estrutura e detalhamento, ele também pode ser utilizado na formulação de modelos. Existem outros protocolos que visam aumentar o nível de detalhamento de um modelo, considerando não só seus propósitos e características, mas dando diretrizes para a documentação do desenvolvimento de um modelo desde o princípio. Esse é o propósito do *TRANSPARENT and Comprehensive model Evaluation* (TRACE). Um documento desse tipo registra todas as

características de design, testes e análises conduzidas pelo autor, desde o princípio do desenvolvimento até o final, o que torna a confecção mais complexa e extensa⁹.

2.5.2. Transparent and Comprehensive model Evaluation (TRACE)

Considerando o ciclo de modelagem, que inclui (ou remove) novas características aos modelos à medida que os processos são testados e analisados, um modelo baseado em agentes, após finalizado, é uma composição dos fragmentos dos diversos submodelos e processos considerados em versões anteriores para se reproduzir um padrão observado num sistema. O objetivo de um documento TRACE é coletar informações do processo de desenvolvimento, desde uma versão inicial até a versão final, considerando todas as análises e testes que levaram às modificações realizadas durante o processo de desenvolvimento. A motivação por trás disso é garantir que o modelo seja “[...] *cuidadosamente projetado, implementado corretamente, testado minuciosamente, bem compreendido e usado de maneira apropriada para seu propósito pretendido*” (GRIMM et al., 2014, p. 131, tradução nossa).

Os documentos TRACE possuem a seguinte estrutura:

- *Formulação de problema*: a seção contém informação a respeito do público-alvo do modelo, especificações das questões respondidas por ele, sua aplicabilidade e extrapolações plausíveis.
- *Descrição de modelo*: os autores sugerem que essa seção do modelo seja descrita por meio do protocolo ODD, que já foi discutido na subseção anterior.
- *Avaliação de dados*: se o modelo utiliza dados externos para calibração e estimação de parâmetros, a seção serve para avaliar os dados utilizados.
- *Avaliação conceitual do modelo*: descrição das suposições por trás do desenvolvimento do modelo.

⁹ Para uma leitura mais aprofundada sobre o protocolo, recomenda-se a leitura de Grimm et al. (2014).

- *Verificação da implementação*: seção que descreve e comprova que o código utilizado para a implementação do modelo foi devidamente testado e documentado.
- *Verificação das saídas dos modelos*: para os casos que os modelos tratam da reprodução de fenômenos observáveis, a seção trata de demonstrar o grau de ajuste do modelo a dados previamente obtidos, além de demonstrar o grau de calibração necessária para se garantir esse ajuste.
- *Análise do modelo*: seção que trata da sensibilidade das saídas do modelo, isto é, quão robusto são os resultados obtidos, além de uma análise dos fenômenos que emergem do modelo criado.
- *Corroboração de saída de modelo*: seção que trata de estudar quão boas são as previsões de um modelo considerando dados que sejam independentes dos que foram utilizados para calibração e, quando possível, dados que os desenvolvedores não tenham tido conhecimento durante o desenvolvimento do modelo.

Geralmente, documentos de tipo TRACE, devido a sua extensão, são disponibilizados de maneira independente do trabalho científico, como em documentos complementares.

3. ABM E ORGANIZAÇÃO INDUSTRIAL

Esta seção trata do uso da ABM em problemas de organização industrial. Nardone (2019) observa que existem poucos trabalhos unindo a ABM com a literatura de organização industrial. Os trabalhos relacionados ao tema estudam como indústrias emergem ou se transformam por meio de agentes que interagem no sistema modelado, tratando-se especificamente de estudos em dinâmica industrial (CARLSSON, 1992, p. 2). Para citar um exemplo, Chang (2010) descreve como existem padrões referentes a entrada e saídas de empresas que são, qualitativamente, similares de indústria para indústria.

Em Schum (2017) essa classe de problemas, que consiste na evolução de uma indústria, pode ser modelada utilizando jogos dinâmicos de oligopólios que resultam em Equilíbrios Perfeitos de Markov, nos quais os jogadores maximizam, por exemplo, o valor esperado de

fluxos de caixa descontados. O desafio, no entanto, é que, se um modelo possui, por exemplo, n empresas com uma variável de estado e uma variável de controle para cada empresa, o espaço teria uma dimensão para cada empresa. Se k pontos no espaço, que representam n -uplas das variáveis de estado das n empresas que participam do jogo, variáveis que podem representar, por exemplo, capacidades produtivas de empresas, são considerados para uma análise seria preciso averiguar k^n pontos distintos para se encontrar uma solução. O problema em questão é denominado *maldição da dimensionalidade*¹⁰.

A modelagem baseada em agentes se torna, então, uma alternativa para solucionar esse tipo de problema. No entanto, é sempre válido levar em conta as características desse tipo de modelagem e que levam em conta suposições que podem não estar presentes em jogos dinâmicos¹¹. Na seção não são revistos todos os trabalhos que foram realizados a respeito da ABM em organização industrial, mas explora-se parte da literatura disponível, auxiliando-se a compreender os principais objetos de estudo nos trabalhos selecionados.

3.1. Aprendizagem

Como observado em Tirole (1988), a aprendizagem é um problema relevante dentro da organização industrial, porque empresas de algumas indústrias podem se tornar mais eficientes pelo simples fato de que elas aprendem. Esse tipo de problema é de natureza dinâmica porque decisões de períodos anteriores implicam um aumento de experiência e consequente redução de custos. Nos trabalhos considerados a seguir, essa área é explorada com a utilização de modelagem baseada em agentes. Busca-se responder os efeitos da aprendizagem sobre o comportamento das empresas e a evolução da indústria em que essas empresas estão inseridas.

Yildizoğlu (2002) busca entender a relevância da aprendizagem na competição utilizando o modelo evolucionário de competição schumpeteriana desenvolvido por Nelson e Winter (1982). No modelo, empresas competem entre si por meio da sua capacidade de

¹⁰ O problema torna a estimação de equilíbrios computacionalmente intensiva. Já existem trabalhos que buscam contornar o problema, Schum (2017) apresenta algumas alternativas.

¹¹ Dentre os que foram discutidos, racionalidade limitada e a possibilidade de estabelecer regras que implicam em efeitos qualitativos sobre um modelo, como as condições para entrada e saída de firmas numa indústria, são exemplos.

inovação e imitação, que dependem do nível de investimento em pesquisa e desenvolvimento. A limitação do modelo original era de que as empresas investiam proporções fixas de seu capital no processo de inovação e imitação, suposição que não era tão razoável, dado o fato de que uma empresa poderia investir mais em um dos dois processos de desenvolvimento ao se ver tecnologicamente distante das empresas concorrentes.

Visando modificar essa restrição no processo de inovação, o autor propõe a utilização de um algoritmo genético¹² que tem o papel de representar a aprendizagem das empresas. O espaço de estratégias de investimento, de maneira adaptativa, é explorado pelas empresas que estão no processo de competição; seu critério de escolha para a melhor combinação é o aumento dos lucros. De imediato, as empresas escolhem as estratégias, mas elas não estão certas de que os lucros de fato aumentarão. Nesse caso, as empresas estão fazendo escolhas às cegas e o sucesso da estratégia se dá pela sobrevivência da empresa na competição. Não é improvável, no entanto, que uma empresa seja capaz de realizar conjecturas ou formar expectativas a respeito de uma determinada estratégia à sua disposição.

O trabalho é estendido em Yıldızoğlu (2001) com o objetivo de tratar da formação das expectativas a respeito dos lucros que uma estratégia pode gerar. A ideia primária do trabalho é que empreender é uma atividade inerentemente arriscada, mas quando o empreendimento envolve o processo de inovação, há uma crença por parte do empreendedor no progresso tecnológico, que é responsável por afetar os lucros. Há, então, uma expectativa de lucro inerente ao processo de inovação.

O autor inclui uma rede neural artificial (RNA) como *modelo interno*, que serve como uma espécie de laboratório para a empresa. Ela utiliza informação do ambiente para testar se a estratégia obtida pelo algoritmo de aprendizagem levará a um aumento no lucro, considerando as circunstâncias do sistema, como o lucro dos últimos períodos e a quantidade de bens vendidos em todo o mercado.

Em geral, empresas que possuem o mecanismo de aprendizagem possuem performance superior quando comparadas às empresas que possuem estratégias de investimento fixas. Além disso, empresas que possuem o mecanismo para formação de expectativas (RNA) em

¹² Tanto o algoritmo genético quanto a rede neural artificial como representação de um processo adaptativo são documentados em Dawid (1999).

combinação com o algoritmo genético superam as empresas que possuem somente aprendizagem adaptativa. A limitação do estudo se encontra no fato de que o modelo interno da empresa é tratado como uma caixa-preta, não havendo uma explicação para seu funcionamento.

Barr e Saraceno (2002) descrevem empresas como unidades de processamento de informação. Uma rede de colaboradores, que aprende coletivamente, obtém informação do ambiente em que a empresa está inserida e toma decisão com base no estado do sistema. No caso, a RNA serve para representar a estrutura interna da empresa e cada um de seus neurônios são como seus colaboradores. Apesar dos trabalhos não estarem relacionados, há uma similaridade com o trabalho realizado por Yildizoğlu (2001) pelo fato de que as empresas utilizam RNAs para representar uma parte da estrutura interna da empresa.

Contudo, a distinção se dá pelo tipo de competição em que essas empresas estão inseridas. No trabalho dos autores, essas empresas estruturadas são inseridas numa competição de Cournot e eles buscam compreender o papel do tamanho da empresa (número de componentes na rede) e a complexidade do ambiente (número de variáveis que compõem o sistema) na aprendizagem da empresa. Mais especificamente, pares de empresas com tamanhos distintos e em diferentes cenários competem entre si em múltiplas rodadas.

Seus resultados apontam que empresas maiores aprendem mais rapidamente a melhor estratégia nesse cenário de competição, escolhendo quantidades próximas do equilíbrio no modelo, e obtêm mais receita. Em contrapartida, as empresas maiores possuem maiores custos.

Outro trabalho que trata de aprendizagem é o de Zhang e Brorsen (2011). Os autores modelam um mercado em que um número limitado de vendedores escolhe a quantidade vendida e o preço de um produto homogêneo simultaneamente e comparam os resultados encontrados com os observados por Brandts (2007) em experimentos de laboratório¹³. Inicialmente, os participantes do mercado escolhem aleatoriamente a quantidade vendida e o preço, mas conforme o modelo se desenvolve as escolhas são determinadas utilizando algoritmos genéticos e otimização por enxame de partículas. O resultado do trabalho sugere

¹³ No experimento, indivíduos são representantes de firmas em cenários de duopólio ou triopólio e eles devem decidir, repetidamente, preços e quantidades.

que em modelos baseados em agentes, sob as suposições apontadas nos experimentos, firmas tendem a produzir acima da demanda de mercado mesmo a preços muito baixos. O fenômeno foi observado também no experimento realizado por Brandts (2007).

Os modelos brevemente tratados até aqui representam apenas mercados mais simples em termos dos produtos. Não há heterogeneidade nos produtos vendidos pelas empresas que compõem a indústria, tampouco são tratadas as características específicas de mercado – por exemplo, tecnologias que modificam produtos e técnicas de produção. A subseção a seguir considera alguns trabalhos que vão tratar da modelagem de mercados específicos.

3.2. Modelagem de mercados específicos

Alguns dos trabalhos que utilizam a metodologia de modelagem baseada em agentes tratam de explicitar mecanismos que podem ser potenciais explicações para fenômenos observados em mercados específicos. Alguns tratam de entender o ciclo de vida de um produto e a evolução do mercado em que o produto está inserido. Outros trabalhos buscam reproduzir a evolução de indústrias e seu inerente processo de competição, bem como realizar um estudo qualitativo a respeito do efeito de políticas sobre o processo competitivo.

3.2.1. Bens duráveis

Porque o produto durável cria competição futura para a empresa que o vende no presente, o tempo se torna variável importante para esse tipo de problema. O desafio é determinar uma política (uma sequência) de preços que maximiza o lucro da empresa que produz o bem. Nesse tipo de problema, modelar o tempo explicitamente pode ser útil, o que torna a modelagem baseada em agentes atrativa.

Diao et al. (2011) propõem um modelo baseado em agentes que busca determinar uma política de preços ótima em cenários de inovação, considerando que os produtos vendidos possuem durabilidade finita. Os autores consideram que existe um único vendedor no sistema e múltiplos agentes compradores. Os produtos vendidos pelo agente possuem durabilidade determinada pelo modelo de ciclo de vida do produto, passando por estágios de produção, crescimento de vendas, maturação e declínio.

De certo modo, assim como em Malerba et al. (2001), descrito a seguir, os autores buscam definir um submodelo para o produto, que é responsável pelas dinâmicas de sistema. A diferença é que em Diao et al. (2011) utiliza-se um modelo específico para descrever a difusão de produtos, ao invés de restringir o produto a características específicas de uma indústria¹⁴ (como as tecnologias disponíveis). Seus resultados apontam que quando um novo produto é desenvolvido, levando em conta um nível de preço fixo, reduzir o preço de venda faz com que um produto tenha maior adesão e consequente maior período de maturação, fazendo com que a empresa obtenha maior receita, mas não necessariamente lucro.

O modelo possui um processo candidato que descreve a precificação de produtos heterogêneos e que possuem um tempo de uso e venda relativamente duradouros. A limitação da abordagem, no entanto, se encontra na ausência de inclusão de outros produtores no ambiente, já que a possibilidade de entrada de concorrentes poderia fazer com que as empresas se engajassem em comportamento estratégico, o que levaria a uma mudança tanto nas estratégias de precificação quanto na frequência de lançamento de produtos. Tratando-se da sequência de lançamentos, é possível que o lançamento de um produto por parte de um concorrente faça com que um produto qualquer, que já esteja estabelecido no mercado, acabe tendo seu ciclo de vida encurtado.

3.2.2. Varejo de Gasolina

Alguns trabalhos buscam reproduzir o varejo de gasolina utilizando a modelagem baseada em agentes em conjunto com outras metodologias. Heppenstall et al. (2005) argumentam que a ABM é ideal para o varejo de gasolina porque a determinação dos preços depende de custos internos, como custos com pessoal, efeitos espaciais (de localidade) e efeitos relacionados ao mercado externo, como o preço do petróleo. O trabalho em questão dá atenção especial ao espaço em que os agentes (postos e consumidores) estão inseridos, considerando como interações locais podem levar os postos de gasolina a determinar seus preços.

¹⁴ A vantagem da restrição de produtos a um espaço de menor dimensão é diminuir a ocorrência de um sobreajuste devido a excesso de parâmetros, por exemplo.

Dois modelos são estimados pelos autores, que buscam reproduzir um mercado de gasolina local¹⁵. Em ambos os modelos, os postos de gasolina são considerados como agentes maximizadores, visando apenas obter maiores lucros, sem estabelecer relações específicas com os outros concorrentes. No primeiro modelo, os postos usam regras simples para determinar preço, considerando os valores praticados pelos agentes próximos e os reajustando, de modo que fiquem similares numa determinada localidade.

No segundo modelo, os autores consideram que a geografia local explica parte das vendas dos postos. Para tanto, utilizam um sistema de informação geográfica, contendo dados a respeito de ruas, rodovias e as coordenadas geográficas dos postos de gasolina. O argumento é o de que um modelo de interação espacial pode ajudar a explicar possíveis diferenças nas estruturas de preço entre áreas rurais e urbanas. O modelo de interação espacial, argumentam os autores, também serve como alternativa para representar o comportamento de consumidores na região. Para realizar o estudo em ambos os modelos, foram utilizados dados diários referentes a preços da gasolina em diferentes postos da localidade estudada, enquanto para realizar o estudo com o modelo que contém interação espacial, além do preço diário dos postos, dados do censo e suas alas, que continham informação sobre o consumo de gasolina médio por ala.

No trabalho, o modelo mais simples, sem interação espacial, não foi capaz de reproduzir os padrões de movimento de preço observados nos condados analisados pelos autores. Por outro lado, o modelo que possuía interação espacial como um de seus submodelos, foi capaz de reproduzir alguns dos movimentos observados, mesmo que fracamente. Os autores argumentam que a ausência de submodelos que levem em conta o mercado externo, como o preço do petróleo bruto, pode ter sido o fator responsável para explicar a sua performance inferior. Cabe um parêntese aqui para lembrar o leitor: o modelo tratava de explicar o movimento nos preços diários, então talvez existam outros elementos importantes para explicar os preços, como as bandeiras dos postos.

Além do movimento diário de preços, o modelo com interação espacial conseguiu representar a distribuição dos preços no espaço estudado. Regiões rurais, menos densamente

¹⁵ No trabalho em questão, os autores buscam reproduzir os mercados dos condados ingleses de South e West Yorkshire.

povoadas, possuíam maiores preços, enquanto as regiões urbanas possuíam menores preços. Além da explicação relacionada a densidade populacional, o número de postos localizados numa determinada região foi também uma explicação considerada pelos autores.

No trabalho, os autores não consideram a possibilidade de interação entre postos, por exemplo, para garantir colusão, apesar de reconhecerem que essa poderia ser uma possibilidade e objetivo de postos. Nesse sentido, o trabalho é estendido por Galchynsky et al. (2011). Levando em conta informações sobre o mercado regional da Ucrânia, a localização dos postos, a densidade populacional e os preços praticados são considerados pelos autores.

O trabalho se difere do anterior, no entanto, com relação às regras praticadas pelos postos e como eles se relacionam entre si. No trabalho, o varejo de gasolina é composto por redes de postos e, por essa razão, os postos praticam preços impostos pela rede. Além disso, cada uma das redes possui diferentes fornecedores de gasolina, permitindo que uma heterogeneidade de custos entre redes seja considerada. Assim como no modelo proposto por Heppenstall et al (2005), os postos, apesar de seguirem preços da rede, possuem regras que determinam parte dos preços que perseguem individualmente. Essas regras servem para considerar fatores relacionados às diferentes demandas atendidas por cada um dos postos, mas também para levar em conta possíveis práticas colusivas que ocorrem entre postos de mesma bandeira.

Inicialmente, o modelo dos autores consegue reproduzir a série de preços estudada e, então, os autores consideram o efeito da inclusão de postos de gasolina que não seguem as regras determinadas. As regras tratam, por exemplo, de como os postos de uma rede reagem quando sofrem aumento nos custos, aumentando preços quase na mesma proporção, e de regras que tratam da combinação de preços entre os postos de uma rede. O efeito da inclusão de postos indiferentes às regras estabelecidas, quando comparado com modelos que só possuem agentes que praticam as regras determinadas, é uma queda nos preços. Nesse caso, os autores argumentam que a regulação de preços por parte de um agente exterior poderia ser efetiva.

Os autores, no entanto, não discutem a respeito de como essa entidade reguladora poderia ser incluída no modelo. Quais condições, por exemplo, sinalizariam a intervenção por

parte do agente regulador e como este poderia intervir no mercado? Essas questões são tratadas, num mercado diferente, no trabalho a seguir.

3.2.3. Energia Elétrica

Como observado nos trabalhos anteriores, é possível utilizar a metodologia de modelagem baseada em agentes para buscar reproduzir padrões de mercado. Sun e Tesfatsion (2007) mostram em seu trabalho que a metodologia pode ser utilizada de maneira prospectiva (ou experimental). No caso, os autores buscaram modelar o mercado de varejo de energia elétrica levando em consideração o *Wholesale Power Market Platform (WPMP)*, que seria um modelo a ser seguido para todos os mercados de varejo dos Estados Unidos da América, proposto pela *Federal Energy Regulatory Commission*.

Devido a complexidade do modelo de mercado proposto, o qual determinava a operação do mercado por organizações regionais de transmissão e condicionava a precificação da energia com base na localização e de entrada ou saída da rede de transmissão, os autores do trabalho argumentavam que havia uma resistência com relação a adoção do modelo de mercado devido a insuficiente testagem e avaliação da política (SUN; TEFATSION, 2007, p.293). O objetivo dos autores ao construir o modelo ABM, então, é de gerar um laboratório eletrônico visando a utilizar dados gerados pelo modelo para comparar, posteriormente, com os fenômenos observados após a implementação do WPMP.

Os autores construíram um modelo *open-source*, denominado *Agent-Based Modeling of Electricity Systems (AMES)*, no qual os agentes negociadores de energia agem de acordo com o comportamento de indivíduos estudados em laboratório¹⁶; a estrutura do mercado em que os negociadores estavam inseridos foi modelada utilizando as regras determinadas pelo WPMP.

Um outro trabalho que trata da modelagem de mercados de eletricidade é o de Micola et al. (2008). Nesse trabalho, os autores buscaram estudar a integralização vertical de

¹⁶ Outras características importantes na implementação do modelo consistiram numa abordagem interdisciplinar, representando a rede de transmissão como uma rede de transmissão alternada, por exemplo. O processo de implementação do modelo, descrito pelos autores, dependeu do apoio dos formadores de políticas públicas de modo a descrever possíveis cenários que poderiam ocorrer e também a coleta de dados sobre a rede que estava sendo estudada.

mercados de eletricidade e de gás natural. Os autores levam em consideração o fato de que os preços do gás natural sejam baseados no preço do produto final, no caso, a energia elétrica, o que motivaria a integralização entre os dois setores.

Os autores consideram duas empresas, uma que lida com o mercado de atacado e outra que lida com o varejo, e o preço do produto de uma necessariamente altera o preço do produto da outra, no sentido de que a empresa que vende no mercado de varejo compra da empresa que vende em atacado. Além disso, os autores consideram que as empresas são capazes de aprender estratégias de precificação. Com o modelo desenvolvido, os autores mostram que a integralização vertical leva, necessariamente, a um aumento tanto nos preços da empresa que vende em atacado quanto da que vende em varejo.

3.2.4. Indústria de Computadores

Como exemplo, o trabalho de Malerba et al. (2001) busca representar a evolução da indústria de computadores, aproximando um modelo baseado em agentes do histórico observado, e entender se políticas antitruste e de entrada de novos participantes no mercado poderiam alterar a estrutura da indústria no curso de sua evolução. Porque a indústria de computadores envolve o progresso tecnológico, os autores escolhem uma abordagem schumpeteriana para descrever o processo de evolução da indústria. Além disso, o progresso tecnológico é limitado pelas tecnologias desenvolvidas até o período de escolha estudado pelos autores. Diferente dos trabalhos brevemente comentados anteriormente, como em Barr e Saraceno (2002) e Yıldızoğlu (2002), os consumidores são heterogêneos. São considerados dois grupos de indivíduos, que possuem diferentes preferências com relação aos atributos dos produtos desenvolvidos pelas empresas participantes da indústria de computadores.

Nesse modelo, então, além das empresas e consumidores terem sido modelados, foi necessário modelar um espaço capaz de descrever as características que um produto vendido pode deter. Malerba et al. (2001) consideram um espaço lancasteriano de atributos para descrever o produto vendido pelas empresas, no qual duas características são a performance, ou a qualidade do computador vendido, e o quão baixo os preços podem ser. Essas características são determinadas, também, pela tecnologia disponível para as empresas, que

podem ser microprocessadores ou transistores, e a sua experiência ao lidar com uma tecnologia nova, que é inicialmente nula. Certos pares de atributos só podem ser alcançados a depender da tecnologia utilizada no produto. Um conjunto de possibilidades, determinado pela tecnologia, pode ser explorado pelas firmas a depender de seu nível de experiência com a tecnologia que está sendo utilizada e, também, o nível de investimento em pesquisa.

O principal destaque do trabalho é como a política antitruste é desenvolvida no sistema, sendo modelada como uma instituição que intervém no mercado a partir do momento no qual uma empresa detém 75% das vendas. Quando o pré-requisito é atingido, a empresa é dividida em duas novas empresas. A política em questão é testada em diferentes períodos, podendo levar até 20 anos após o cumprimento do pré-requisito para que seja aplicada. Os autores observaram que, dados os limites dos avanços tecnológicos e possibilidade de tornar mais barato os produtos vendidos, a demora na aplicação de uma política torna ela mais eficaz, já que quando aplicada muito cedo, é possível que uma das empresas acabe por crescer no ambiente e se torne um monopólio.

Com relação a políticas de entrada, diferentes sistemas de subsídio foram testados pelos autores. No primeiro teste, empresas recebiam subsídios de acordo com seus orçamentos iniciais para explorar tecnologias. O segundo teste avaliava a aplicação de um subsídio para empresas recém-criadas, porque essas poderiam não possuir recursos suficientes para se manterem competitivas diante das empresas que já estavam presentes no mercado anteriormente. O terceiro e último teste consistia num subsídio que dava suporte a entrada de novas empresas. Os resultados dos autores sugeriram que subsídios para empresas recém-criadas não surtem nenhum efeito sobre o nível de concentração de mercado, porém, os outros dois tipos de políticas surtem efeitos sobre o nível de concentração, apesar de serem considerados pequenos pelos autores.

3.2.5. Indústria de Petróleo

Ainda na linha de modelagem de mercados específicos, Wood et al. (2016) buscaram modelar a alternância do poder de mercado na indústria de petróleo. O objetivo dos autores era construir um modelo capaz de reproduzir a disputa entre a Organização dos Países

Exportadores de Petróleo (OPEP) e as Sete Irmãs do Petróleo, durante as décadas de 1960 e 1970.

Para reproduzir a disputa, os autores escolheram modelá-la utilizando teoria dos jogos evolucionária¹⁷. Presumiu-se que duas populações heterogêneas e de tamanhos idênticos, interagem estrategicamente com respeito aos recursos energéticos que estavam à sua disposição. E, com o passar do tempo, empresas aprendiam com o processo de disputa pelo mercado. Com heurísticas e submodelos pré-determinados a partir do modelo evolucionário, um modelo baseado em agentes análogo ao jogo evolucionário foi construído de modo a gerar simulações e construir retratos de fase, para entender os possíveis equilíbrios obtidos pelas condições iniciais do modelo.

Levando em conta a estrutura proposta por Railsback e Grimm (2019), o padrão a ser reproduzido foi a competição entre os dois cartéis e a posterior dominação por parte da OPEP, e o modelo evolucionário trata de determinar os submodelos seguidos pelas empresas. Tanto analiticamente quanto utilizando ABM, o modelo mostra que é possível que empresas aprendam a operar como um cartel quando sua performance, mensurada em termos de lucro, está abaixo do que desejam, além de determinar um equilíbrio em que sua concorrente detenha uma menor fatia do mercado. De modo mais abrangente, o modelo mostra que é possível descrever transição de poder entre cartéis ou grupos utilizando heurísticas, a respeito de como as empresas se sentem ou agem, e aprendizagem evolucionária.

3.3. Cartéis

Como o próprio Cade descreve:

“Cartel é qualquer acordo ou prática concertada entre concorrentes para fixar preços, dividir mercados, estabelecer quotas ou restringir produção, adotar posturas pré-combinadas em licitação pública, ou que tenha por objeto qualquer variável concorrencialmente sensível. Os cartéis, por implicarem aumentos de preços e restrição de oferta e nenhum benefício econômico compensatório, causam graves prejuízos aos consumidores tornando bens e serviços completamente inacessíveis a alguns e desnecessariamente caros para outros.” (*Cade, 2016, p. 14*)

¹⁷ Ver Weibull (1995).

A modelagem baseada em agentes se torna uma ferramenta atrativa para esse tipo de trabalho porque permite a criação de um laboratório em que as condições necessárias para a sua formação sejam estudadas. Por outro lado, a modelagem também pode, talvez, permitir a compreensão dos efeitos de um cartel sobre os preços de mercado.

Supondo uma situação de dilema de prisioneiro, a estabilidade de um cartel não parece plausível. Embora as empresas que estejam num mercado qualquer possam combinar, por exemplo, quantidades produzidas, ofertando um número menor de bens com o objetivo de auferir maiores lucros, quando uma empresa cumpre o acordo e a outra desvia, a empresa que desvia consegue auferir lucros superiores aos da empresa que seguiu o acordado. Nesse caso, o equilíbrio seria aquele em que as empresas produzem quantidades relacionadas ao desvio do contrato posto entre as partes.

Para garantir o cumprimento do acordo, considerando a possibilidade de conduta desviante, é preciso que haja algum mecanismo que garanta o cumprimento do contrato realizado pelas partes. Um mecanismo, descrito em Tirole (1988), seria uma terceira empresa ou entidade que propõe um selo entre as empresas que participam do cartel, diferenciando os bens. Um segundo mecanismo, mais simples, mas igualmente interessante, proposto por Silveira (2020), seria a possibilidade de que as empresas, no processo de interação, além de poderem escolher as quantidades a serem produzidas, pudessem punir a competidora que faz parte do contrato e se desvia da conduta colusiva¹⁸.

O autor propõe um jogo evolucionário que estuda a estabilidade de cartéis sob esse cenário. As simulações realizadas, similares às propostas em Wood et al. (2016), consistem na criação de populações que possuem estratégias heterogêneas e empresas de dois tipos distintos. Um tipo de empresa possui menores custos de produção e monitoramento de cartéis, enquanto o outro tipo possui custos maiores. As condutas de colusão, de desvio e de punição são proporcionalmente distribuídas entre os tipos de empresas, de modo a refletir a estrutura de custos de cada tipo de empresa; empresas de custos menores são mais propensas a realizar colusão e punição. Com relação a natureza da estratégia de punição, ela funciona

¹⁸ A punição é uma estratégia disponível a um tipo de específico de firma que reduz a recompensa da firma desviante. Na literatura, de acordo com o autor, punições podem ser, por exemplo, ameaças de redução nos preços e a possibilidade de guerra de preços.

como colusão quando a empresa interage com outra empresa que realiza conduta colusiva, mas como punição para a empresa que desvia de uma conduta colusiva.

Considerando que a punição recebida por uma empresa desviante superasse o custo de se punir a empresa e o fato de que as populações estavam distribuídas espacialmente, o autor verificou, dentro do modelo, que a estabilidade de um cartel dependeria da distância entre as empresas desviantes. Quanto mais “adensadas” estivessem no espaço, ou seja, quanto mais próximas umas das outras as empresas desviantes estivessem, menos eficaz (ou estável) é a estratégia de punição. Outra condição importante para a eficácia da estratégia é a necessidade de que, na inicialização da simulação, a maioria das empresas empreguem o uso da estratégia de punição. Para o caso de indústrias que não competem espacialmente, como seria o caso de lojas virtuais, a estabilidade da estratégia de punição é superior.

Dentre as consequências possíveis de cartéis, há a possibilidade de aumento de preços, devido à pressão exercida pela colusão, ou redução nas quantidades produzidas. A perda de lucro pode ser uma consequência quando o produto vendido por um cartel é insumo de um produto numa cadeia de produção. De acordo com CADE (2016), a existência de um cartel pode levar a um sobrepreço estimado, quando comparado a um mercado competitivo, de 10 a 20%. Nardone e Cecconi (2019) apontam que uma das causas do sobrepreço é um efeito de transmissão que ocorre em situações nas quais empresas comprem insumos de um cartel e elevam os preços de seu produto final. Os autores desenvolvem um modelo baseado em agentes considerando esse cenário.

As empresas do modelo estão numa cadeia de suprimentos, elas compram insumos de um nível anterior e vendem produtos processados para um nível posterior da cadeia. O objetivo dos autores é estimar os efeitos sobre o preço sob uma competição desse molde considerando que existe um nível da cadeia em que ocorre um cartel: as empresas da cadeia de produção a um nível anterior a outras firmas (de um estágio? Qual o estágio em questão?) combinam de determinar preços acima do nível competitivo para os produtos que estão vendendo, mas ainda são tomadoras de preços com relação aos insumos necessários para produção dos bens que são vendidos. Além do comportamento colusivo, empresas podem determinar se vão realizar comércio ou não com um agente da cadeia a depender do nível de preços.

No modelo, as empresas estão organizadas numa rede hierárquica e produzem um produto homogêneo, no caso, cada estágio produz parte do produto final. O número de insumos utilizados por uma empresa, que é obtido numa fase anterior da cadeia, é igual ao número de bens produzidos. O que determina a quantidade produzida pela rede de suprimentos é a quantidade de bens demandada por consumidores. Considerando que diferentes empresas na ponta da rede podem praticar diferentes preços de produtos, porque elas comprem de diferentes fornecedores, os consumidores comprem os bens de menor preço e, caso o estoque de uma empresa seja esgotado, os consumidores que não conseguiram realizar sua demanda comprem de uma empresa que tenha estoque e o menor preço possível.

Com relação a empresas que fazem parte de um cartel e empresas que não o fazem, as empresas de cartéis seguem uma regra simples para determinar seus preços, levando em conta a soma dos custos das empresas que fazem parte do cartel. Por outro lado, as empresas que não fazem parte do cartel possuem regras adaptativas responsáveis pela determinação de preços e de quantidades a depender da demanda das outras empresas e consumidores.

Com o modelo determinado pelos autores, os resultados sugerem que o aumento de preços, num primeiro momento, depende principalmente do número de empresas que participam do cartel. Outro resultado qualitativamente similar ao modelo de Silveira (2020) é o fato de que o efeito de um cartel sobre os preços de um outro nível depende da distância entre os níveis comparados: mesmo que um produto tenha preço maior numa camada anterior, esse aumento vai se dissipando ao chegar em níveis posteriores de produção; é preciso que um cartel seja conduzido em vários níveis de produção para que o efeito se estenda por toda cadeia. Além disso, o efeito de transmissão depende do número de empresas presentes num cartel, quanto menor for esse número, maior será o efeito de transmissão em diferentes níveis da cadeia. Aliado a este efeito, também se observou que quanto maior for a distância entre o nível do cartel, menor será o efeito de transmissão, isto é, *“firmas a jusante passam uma proporção inferior dos custos que enfrentam”* (NARDONE e CECCONI, 2019, p. 89, tradução nossa).

Por fim, é necessário ressaltar que não se está endossando as opiniões dos autores dos trabalhos descritos, tampouco os resultados encontrados por eles são de fácil mensuração ou

certamente ocorreriam num caso concreto. Os resultados obtidos pelos autores dependem desde a maneira que os modelos foram desenvolvidos, considerando suposições específicas com relação ao funcionamento de mercados, até a calibração dos parâmetros que foram utilizados em seus submodelos. Apenas buscou-se descrever parte da literatura existente atualmente para finalidade didática.

4. CONCLUSÃO

Alguns trabalhos que utilizam a modelagem baseada em agentes como metodologia para a representação de fenômenos observados na economia foram apresentados e brevemente discutidos. Como visto, existem desde trabalhos que tratam especificamente da possibilidade de aprendizagem por parte das empresas que compõem uma indústria, até trabalhos que incluem a aprendizagem como um componente adicional, um submodelo, para explicar como empresas se adaptam em indústrias específicas. Em um dos trabalhos, os autores até utilizam um modelo para determinar o ciclo de vida de um produto, além de modelar os outros aspectos concernentes ao mercado.

Durante a execução do trabalho, notou-se uma escassez de artigos que tratam de outros temas importantes dentro da organização industrial, especificamente dentro da temática antitruste. Há poucos trabalhos que tratem extensivamente de questões concorrenciais, mas como já mencionado anteriormente, essa é uma característica comum dentro da área de organização industrial. Há poucos trabalhos que tratem dessa área de estudo e utilizem a metodologia em questão.

Apesar de não discutido ao longo do texto, uma outra característica observada foi a heterogeneidade na maneira pela qual os trabalhos foram apresentados pelos autores. Apesar de protocolos já terem sido definidos para auxiliar na construção e descrição de modelos, a maioria dos trabalhos mencionados, mesmo considerando os mais recentes, não os utilizam.

Faz-se necessário, então, realizar mais estudos que fomentem o uso da metodologia na área, caso possível. Isso porque, a depender do objeto de estudo, é preciso determinar submodelos capazes de explicar o comportamento individual das empresas para fenômenos observados, o que já seria um trabalho independente por si só. Para tornar a literatura mais homogênea e de fácil exposição, sugere-se que trabalhos do gênero utilizem protocolos como o ODD.

BIBLIOGRAFIA

- Barr, J., & Saraceno, F. (2002). A computational theory of the firm. *Journal of Economic Behaviour and Organization*, 49, 345-361. doi:10.1.1.19.3015
- Brandts, J., & Guillen, P. (2007). Collusion and Fights in an Experiment with Price-Setting Firms and Advance Production. *The Journal of Industrial Economics*, 55, 453-473. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/4622394>
- Carlsson, B. (1992). Industrial dynamics: a framework for analysis of industrial transformation. *Revue d'économie industrielle*, 61, 7-32. doi:10.3406/rei.1992.1434
- Carrella, E., Bailey, R., & Madsen, J. K. (2020). Calibrating Agent-Based Models with Linear Regressions. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 23, 7. doi:10.18564/jasss.4150
- Dawid, H. (1999). *Adaptive Learning by Genetic Algorithms*. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-18142-9
- Diao, J., Zhu, K., & Gao, Y. (2011). Agent-based Simulation of Durables Dynamic Pricing. *Systems Engineering Procedia*, 2, 205-212. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sepro.2011.10.024>
- Epstein, J. M. (1999). Agent-based computational models and generative social science. *Complexity*, 4, 41-60. doi:[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0526\(199905/06\)4:5<41::AID-CPLX9>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0526(199905/06)4:5<41::AID-CPLX9>3.0.CO;2-F)
- Galchynsky, L., Svydenko, A., & Veremenko, I. (2011, 5). The Agent-Based Model Of Regulation Of Retail Prices On The Market Of Petroleum Products. *Polish Journal of Management Studies*, 3, 136-147. Retrieved from <https://ideas.repec.org/a/pcz/journal/v3y2011i1p136-147.html>
- Grimm, V., & Railsback, S. F. (2005, 11 28). *Individual-based Modeling and Ecology*. Princeton University Press. Retrieved from https://www.ebook.de/de/product/21819959/volker_grimm_individual_based_modeling_and_ecology.html

- Grimm, V., Augusiak, J., Focks, A., Frank, B. M., Gabsi, F., Johnston, A. S., . . . Railsback, S. F. (2014). Towards better modelling and decision support: Documenting model development, testing, and analysis using TRACE. *Ecological Modelling*, 280, 129–139. doi:10.1016/j.ecolmodel.2014.01.018
- Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., . . . DeAngelis, D. L. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, 198, 115–126. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023
- Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J., & Railsback, S. F. (2010). The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling*, 221, 2760–2768. doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019
- Grimm, V., Railsback, S. F., Vincenot, C. E., Berger, U., Gallagher, C., DeAngelis, D. L., . . . Ayllón, D. (2020). The ODD Protocol for Describing Agent-Based and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural Realism. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 23, 7. doi:10.18564/jasss.4259
- Heppenstall, A. J., Evans, A. J., & Birkin, M. H. (2005). A Hybrid Multi-Agent/Spatial Interaction Model System for Petrol Price Setting. *Transactions in GIS*, 9, 35-51. doi:https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2005.00204.x
- Lagarrigues, G., Jabot, F., Lafond, V., & Courbaud, B. (2015). Approximate Bayesian computation to recalibrate individual-based models with population data: Illustration with a forest simulation model. *Ecological Modelling*, 306, 278-286. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.09.023
- Malerba, F., Nelson, R., Orsenigo, L., & Winter, S. (2001). Competition and industrial policies in a ‘history friendly’ model of the evolution of the computer industry. *International Journal of Industrial Organization*, 19, 635–664. doi:10.1016/S0167-7187(00)00087-4
- Nardone, C. (2019). Agent-Based Computational Economics and Industrial Organization Theory. In F. Cecconi, & M. Campennì (Eds.), *Information and Communication Technologies (ICT) in Economic Modeling* (pp. 3–14). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-22605-3_1

Nardone, C., & Cecconi, F. (2019). Passing-on in Cartel Damages Action: An Agent-Based Model. In *Information and Communication Technologies (ICT) in Economic Modeling* (pp. 71-90). Springer International Publishing.

Nelson, R. R., & Winter, S. G. (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Harvard University Press. Retrieved from https://www.ebook.de/de/product/3239152/richard_r_nelson_sidney_g_winter_an_evolutionary_theory_of_economic_change.html

North, M., Conzelmann, G., Koritarov, V., Macal, C., Thimmapuram, P., & Veselka, T. (2002, 5). E-laboratories : agent-based modeling of electricity markets. *American Power Conference*. Retrieved from <https://www.osti.gov/biblio/795033>

Railsback, S. F., & Grimm, V. (2019, 3 26). *Agent-Based and Individual-Based Modeling*. Princeton University Press.

Rosa, M. B., & Melo, M. C. (Eds.). (2016). *Cartilha do CADE*. CADE.

Silveira, D. S. (2020). *Three essays on cartel agreements*. Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Juíz de Fora.

Sun, J., & Tesfatsion, L. (2007). Dynamic Testing of Wholesale Power Market Designs: An Open-Source Agent-Based Framework. *Computational Economics*, 30, 291–327. doi:10.1007/s10614-007-9095-1

Tesfatsion, L. (2006). Chapter 16 Agent-Based Computational Economics: A Constructive Approach to Economic Theory. In L. Tesfatsion, & K. L. Judd (Eds.). Elsevier. doi:[https://doi.org/10.1016/S1574-0021\(05\)02016-2](https://doi.org/10.1016/S1574-0021(05)02016-2)

Tesfatsion, L. (2021). Agent-Based Computational Economics: Overview and Brief History. *Economics Working Papers*, 13.

Tirole, J. (1988, 1 1). *The Theory of Industrial Organization*. MIT Press Ltd. Retrieved from https://www.ebook.de/de/product/3599616/jean_tirole_the_theory_of_industrial_organization.html

Weibull. (1995). *Evolutionary game theory*. Cambridge, Mass: MIT Press.

Weisfeld, M. (2013). *The object-oriented thought process*. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley.

Wood, A. D., Mason, C. F., & Finnoff, D. (2016). OPEC, the Seven Sisters, and oil market dominance: An evolutionary game theory and agent-based modeling approach. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 132, 66-78. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jebo.2016.06.011>

Yıldızoğlu, M. (2001). Connecting adaptive behaviour and expectations in models of innovation: The Potential Role of Artificial Neural Networks. *European Journal of Economic and Social Systems*, 15, 203-220. doi:10.1051/ejess:2001105

Yıldızoğlu, M. (2002). Competing R&D Strategies in an Evolutionary Industry Model. *Computational Economics*, 19, 51–65. doi:10.1023/A:1014945023982

Zhang, T., & Brorsen, B. W. (2011). Oligopoly firms with quantity-price strategic decisions. *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 6, 157. doi:10.1007/s11403-011-0081-2