

Walras na Era da IA



Produzido por:

Vítor Lima

Partner na Crivosoft, Lda

Coordenador do MBA em Marketing Digital e eCommerce, no
ISLA Santarém - Instituto Politécnico



Introdução

A teoria do equilíbrio geral, formulada por Léon Walras no século XIX, constitui um dos pilares fundamentais da teoria económica neoclássica.

Baseada na premissa de que mercados interdependentes podem alcançar um estado de equilíbrio simultâneo por meio da interação entre oferta e procura, a visão walrasiana fundamenta grande parte dos modelos matemáticos utilizados na economia moderna (Arrow & Debreu, 1954).

No entanto, na era da inteligência artificial (IA) e da economia digital, a validade desta teoria tem sido crescentemente questionada.

O surgimento de algoritmos avançados, big data e modelos de aprendizagem de máquina transformou profundamente a forma como os mercados operam, levantando a questão: até que ponto as suposições de Walras ainda são aplicáveis num mundo onde agentes económicos não são apenas humanos, mas também sistemas automatizados com capacidade de decisão e aprendizagem adaptativa?

A teoria walrasiana repousa sobre três pilares fundamentais: a racionalidade dos agentes económicos, a existência de um “leiloeiro” que ajusta preços até que todos os mercados se equilibrem e a hipótese de informação perfeita (Walras, 1874).

Estas premissas foram contestadas ao longo do tempo por diversas escolas do pensamento económico.

Friedrich Hayek (1945), por exemplo, argumentou que a informação é dispersa e não pode ser centralizada, o que contraria a conceção walrasiana de um leiloeiro omnisciente.

John Maynard Keynes (1936) demonstrou que os mercados podem permanecer em desequilíbrio por longos períodos devido à procura efetiva, um fenómeno ausente na formulação original de Walras.

Mais recentemente, estudos da economia comportamental e experimental reforçaram a visão de que os agentes não são perfeitamente racionais, mas sujeitos a vieses cognitivos e restrições informacionais (Kahneman, 2011).

O avanço da inteligência artificial intensifica estas problemáticas, ao mesmo tempo que reabre o debate sobre a viabilidade da teoria do equilíbrio geral.

Em mercados contemporâneos, os algoritmos desempenham papéis centrais na definição de preços e na alocação de recursos, muitas vezes superando as capacidades dos agentes humanos.

Empresas como a Amazon, a Google e hedge funds baseados em IA utilizam modelos dinâmicos para ajustar preços em tempo real, desafiando a noção tradicional de equilíbrio de longo prazo (Agrawal, Gans & Goldfarb, 2018).

Além disso, a existência de mercados de alta frequência e de redes neurais que operam sob dinâmicas complexas levanta a hipótese de que o equilíbrio, se existir, pode não ser estático, mas um fenómeno emergente e mutável (Arthur, 1994).

Diante destas transformações, este ensaio procura examinar a validade da teoria do equilíbrio geral walrasiana à luz da revolução da inteligência artificial.

Para isso, o estudo será dividido em cinco seções principais.

A primeira explorará os fundamentos da teoria de Walras, contextualizando o seu impacto na economia neoclássica.

A segunda analisará as principais críticas históricas e contemporâneas ao modelo walrasiano.

A terceira seção discutirá como a inteligência artificial e os mercados algorítmicos estão a reformular as bases tradicionais da economia.

Em seguida, a quarta parte avaliará se a teoria de Walras pode ser reinterpretada ou reformulada para acomodar estas novas realidades.

Por fim, a conclusão sintetizará as implicações teóricas e políticas deste debate, apontando caminhos para pesquisas futuras.

Ao longo desta investigação, será adotada uma abordagem interdisciplinar, combinando teoria económica, ciência da computação e filosofia da informação.

O objetivo é não só avaliar a aplicabilidade da teoria walrasiana na era da inteligência artificial, mas também refletir sobre o futuro da economia como ciência, num contexto no qual a tomada de decisões não está mais restrita à racionalidade humana, mas distribuída entre agentes inteligentes, humanos e não humanos.



Capítulo 1 – A Teoria do Equilíbrio Geral de Walras: Fundamentos e Evolução

A teoria do equilíbrio geral desenvolvida por Léon Walras no século XIX representa uma das contribuições mais significativas para a economia neoclássica.

O seu objetivo central era demonstrar matematicamente como os mercados interligados poderiam atingir um estado de equilíbrio simultâneo, onde a oferta e a procura se igualam em todos os bens e serviços.

Esta abordagem não só forneceu uma base formal para a análise económica, mas também influenciou profundamente o pensamento económico subsequente, culminando em refinamentos matemáticos e discussões epistemológicas sobre a possibilidade real deste equilíbrio em economias concretas.

Este capítulo explora os fundamentos da teoria de Walras, as suas premissas e o desenvolvimento teórico que decorreu da sua formulação original.



1.1. Léon Walras e a Escola de Lausanne

Léon Walras (1834–1910) foi um dos principais expoentes da Escola de Lausanne, que, juntamente com economistas como Vilfredo Pareto, procurou formalizar a economia como uma ciência matemática.

A sua principal obra, *Éléments d'économie politique pure* (1874), estabeleceu a base para a teoria do equilíbrio geral, propondo um modelo no qual todos os mercados estariam interligados e tenderiam a um estado de equilíbrio sob certas condições.

Inspirado pelas leis da física e pela matemática da época, Walras concebeu a economia como um sistema de equações simultâneas, onde os preços desempenham o papel de variáveis ajustáveis que coordenam a alocação eficiente dos recursos (Jaffé, 1981).

A abordagem walrasiana contrastava com a tradição clássica, representada por economistas como Adam Smith e David Ricardo, que enfatizavam a dinâmica de mercado e os mecanismos de ajuste baseados no comportamento dos agentes.

Walras, por outro lado, propôs um modelo formal e estático, baseado na ideia de que os preços se ajustam continuamente até que um equilíbrio geral seja alcançado.

Esse modelo foi posteriormente refinado por Pareto (1906), que introduziu o conceito de eficiência paretiana, e pelos trabalhos mais rigorosos de economistas do século XX, como Arrow e Debreu (1954), que forneceram provas formais da existência do equilíbrio geral sob certas condições matemáticas.

1.2. O Modelo Walrasiano de Equilíbrio Geral

O modelo de Walras baseia-se na ideia de que todos os mercados numa economia estão interligados e que, por meio de um processo de ajuste de preços, a oferta e a procura se igualam simultaneamente.

Esta visão contrasta com o conceito de equilíbrio parcial proposto por Alfred Marshall (1890), que analisava mercados isoladamente.

O modelo de equilíbrio geral de Walras pode ser formalmente descrito por um sistema de equações, no qual:

- Existe um conjunto finito de agentes económicos (consumidores e produtores);
- Cada agente possui uma dotação inicial de bens e recursos produtivos;
- Cada consumidor procura maximizar a sua utilidade, sujeita a restrições orçamentais;

- Cada produtor procura maximizar o seu lucro, escolhendo níveis ótimos de produção;
- Os preços ajustam-se de forma a equilibrar a oferta e a procura em todos os mercados simultaneamente.

A peça central do modelo é o “leiloeiro walrasiano”, uma figura teórica que ajusta os preços até que o equilíbrio seja alcançado.

Esse processo, conhecido como tâtonnement (ou “tateamento”), assume que não ocorrem transações fora do equilíbrio – ou seja, os agentes apenas compram e vendem bens quando os preços atingem um nível de equilíbrio que iguala oferta e procura em todos os mercados (Walras, 1874).

Esta conceção tem implicações profundas para a teoria económica, pois sugere que, sob certas condições, os mercados podem alcançar um equilíbrio eficiente sem a necessidade de intervenção externa.

No entanto, ela também levanta uma série de questões filosóficas e epistemológicas sobre a viabilidade deste processo em economias reais, um ponto que será explorado nos capítulos subsequentes.

1.3. Suposições Fundamentais: Racionalidade, Informação Perfeita e Competição Perfeita

O modelo walrasiano repousa sobre um conjunto de premissas essenciais que garantem a existência do equilíbrio geral.

Entre as principais estão:

1. **Racionalidade dos Agentes:** Os consumidores e produtores são considerados agentes racionais que tomam decisões baseadas na maximização de utilidade e lucro, respetivamente. Esta suposição tem sido amplamente questionada por pesquisas em economia comportamental, que demonstram que os agentes frequentemente se desviam da racionalidade perfeita devido a vieses cognitivos e restrições informacionais (Kahneman & Tversky, 1979);

2. **Informação Perfeita:** Todos os agentes possuem conhecimento completo sobre preços, preferências e tecnologia produtiva. No entanto, como argumentou Friedrich Hayek (1945), a informação na economia real é dispersa e imperfeita, o que levanta dúvidas sobre a viabilidade da coordenação walrasiana sem um mecanismo descentralizado de descoberta de preços;

3. **Competição Perfeita:** O modelo assume que não há barreiras à entrada ou saída de mercados, e que nenhum agente individual pode influenciar os preços. No entanto, em economias modernas, caracterizadas por monopólios, oligopólios e mercados digitais dominados por grandes corporações, esta suposição parece distante da realidade empírica (Stiglitz, 2017).

Estas premissas foram fundamentais para a formalização matemática da teoria do equilíbrio geral, mas também se tornaram o alvo principal das críticas e das revisões subsequentes, especialmente à medida que novas abordagens computacionais e empíricas passaram a desafiar a visão tradicional walrasiana.

1.4. Desenvolvimento da Teoria do Equilíbrio Geral no Século XX

No século XX, a teoria do equilíbrio geral foi melhorada e formalizada matematicamente por John Hicks (1939), Kenneth Arrow e Gérard Debreu (1954).

No seu artigo seminal, Arrow e Debreu demonstraram a existência matemática do equilíbrio geral sob condições rigorosas, utilizando técnicas da análise convexa e da teoria dos jogos.

Entretanto, apesar do sucesso matemático, a aplicabilidade empírica do modelo permaneceu controversa.

Economistas como Frank Hahn (1973) e Alan Kirman (1989) argumentaram que o equilíbrio geral é, na melhor das hipóteses, uma abstração útil, mas incapaz de capturar a complexidade dinâmica das economias reais.

Modelos alternativos, como a teoria dos mercados descentralizados e a economia baseada em agentes (Arthur, 1994), começaram a ganhar força como tentativas de superar as limitações do paradigma walrasiano.

Além disso, a ascensão da computação e da inteligência artificial trouxe novos desafios e oportunidades para a teoria do equilíbrio.

Algoritmos de precificação dinâmica, mercados eletrônicos e redes neurais introduziram um novo tipo de processo de formação de preços, que difere fundamentalmente do leiloeiro walrasiano tradicional.

Como resultado, a validade do equilíbrio geral num mundo dominado pela IA tornou-se uma questão de debate central na economia contemporânea, o que será abordado nos capítulos seguintes.

Conclusão

A teoria do equilíbrio geral de Walras estabeleceu as bases para a economia neoclássica e influenciou profundamente o pensamento económico do século XX.

No entanto, as suas premissas fundamentais – racionalidade perfeita, informação completa e competição irrestrita – têm sido cada vez mais questionadas, especialmente em face das transformações trazidas pela inteligência artificial.

À medida que os mercados se tornam mais dinâmicos e os algoritmos passam a desempenhar um papel central na alocação de recursos, a relevância do equilíbrio walrasiano para a economia contemporânea precisa ser reavaliada, uma tarefa que será abordada nos próximos capítulos deste ensaio.

Capítulo 2 – Críticas Clássicas e Revisões da Teoria Walrasiana

A teoria do equilíbrio geral de Léon Walras foi uma das tentativas mais ambiciosas de formalizar a economia como uma ciência matemática, apresentando um modelo elegante e abstrato da coordenação de mercados.

No entanto, desde a sua formulação no século XIX, a sua validade e aplicabilidade à realidade económica foram amplamente questionadas.

Diversas críticas emergiram de diferentes correntes do pensamento económico, contestando as suposições de racionalidade perfeita, informação completa, competição irrestrita e a própria viabilidade do processo de ajuste de preços proposto por Walras.

Este capítulo examina as principais críticas à teoria do equilíbrio geral, destacando argumentos da Escola Austríaca, de Keynes, da economia comportamental e da teoria dos mercados descentralizados.

Além disso, discute revisões modernas da teoria, incluindo abordagens baseadas em economia computacional e sistemas complexos.

2.1. A Inviabilidade Computacional do Equilíbrio Geral

Uma das críticas mais fundamentais à teoria walrasiana é a sua inviabilidade computacional.

O modelo de equilíbrio geral pressupõe que os preços se ajustam por meio de um processo iterativo – o tâtonnement – conduzido por um “leiloeiro” hipotético que calcula e anuncia preços até que a oferta e a procura se igualem em todos os mercados simultaneamente.

No entanto, a complexidade matemática envolvida neste processo sugere que a sua implementação numa economia real seria extremamente difícil, senão impossível.

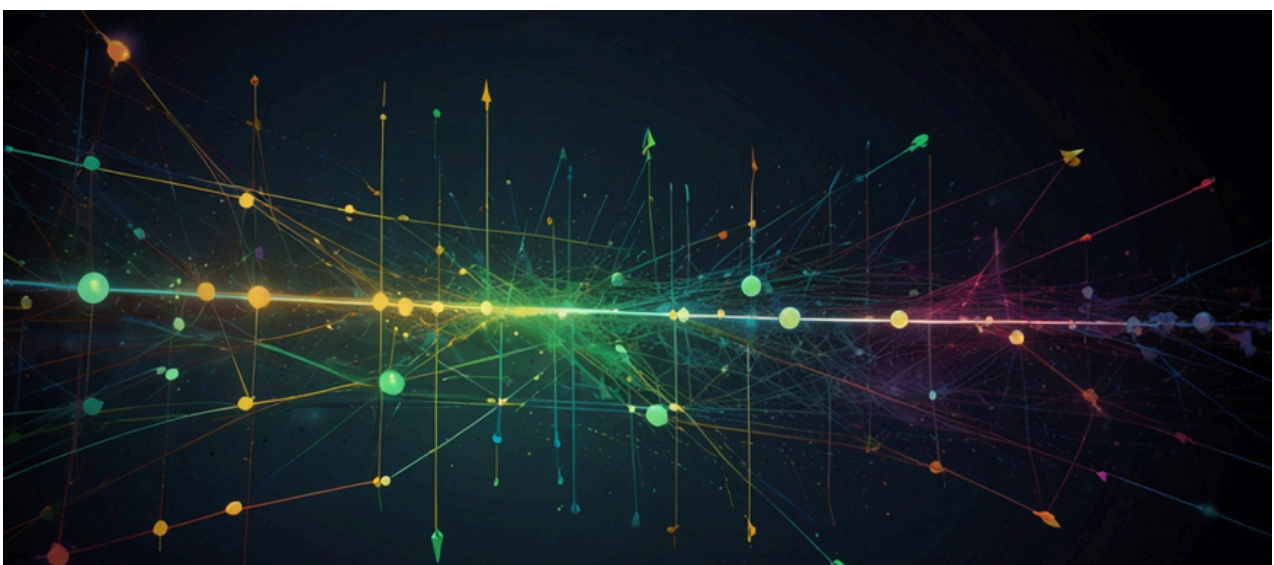
Kenneth Arrow e Gérard Debreu (1954) demonstraram formalmente a existência do equilíbrio geral, mas a sua prova depende de condições extremamente restritivas, incluindo convexidade das preferências e tecnologias, bem como a ausência de retornos crescentes de escala.

Além disso, Herbert Scarf (1960) mostrou que os algoritmos tradicionais para encontrar equilíbrios gerais são altamente ineficientes, com tempos de convergência que crescem exponencialmente com o número de mercados.

Em termos práticos, a economia real opera de forma descentralizada, sem a presença de um leiloeiro central.

Como argumentou Alan Kirman (1989), o processo de ajuste de preços não ocorre de forma ordenada e sequencial, mas sim por meio de interações dinâmicas entre agentes que possuem informação limitada e reagem de forma adaptativa às condições do mercado.

Assim, a concepção walrasiana do equilíbrio geral parece distante da realidade empírica das economias modernas.



2.2. A Escola Austríaca e a Teoria do Processo de Mercado

A Escola Austríaca, liderada por economistas como Ludwig von Mises (1949) e Friedrich Hayek (1945), apresentou uma das críticas mais incisivas ao modelo walrasiano, argumentando que a economia deve ser vista não como um sistema estático de equações, mas como um processo dinâmico de descoberta.

Hayek, em particular, contestou a suposição de informação perfeita implícita no modelo de equilíbrio geral.

No seu ensaio “The Use of Knowledge in Society” (1945), ele argumentou que a informação na economia é dispersa e localizada – ou seja, cada agente económico possui apenas um subconjunto do conhecimento total disponível no sistema.

Em vez de um leiloeiro central ajustando os preços, os mercados reais funcionam como mecanismos de descoberta, onde agentes descentralizados ajustam as suas decisões com base em sinais de preços emergentes.

Esta visão difere radicalmente da abordagem walrasiana.

Enquanto Walras concebia a economia como um sistema fechado de equações resolvíveis, os austríacos viam-na como um sistema aberto e adaptativo, no qual os preços emergem da interação entre indivíduos e onde o equilíbrio, se existir, é apenas um estado temporário e nunca plenamente alcançado.

2.3. Keynes e a Crítica da Procura Efetiva

John Maynard Keynes, em *The General Theory of Employment, Interest and Money* (1936), criticou profundamente a visão walrasiana, especialmente no que diz respeito ao mercado de trabalho e à determinação do nível de emprego e rendimento.

Walras supunha que mercados sempre se ajustariam para eliminar excessos de oferta e procura, garantindo o pleno emprego dos recursos.

No entanto, Keynes demonstrou que a economia pode permanecer em estados de desequilíbrio prolongado devido à insuficiência da procura agregada.

O argumento central de Keynes é que o investimento e o consumo não são apenas funções dos preços relativos e das taxas de juros, mas também das expectativas e da confiança dos agentes económicos.

Assim, uma economia pode entrar em recessão simplesmente porque os agentes decidem reduzir os seus gastos, criando um ciclo vicioso de desemprego e queda da produção.

Este fenómeno, conhecido como “procura efetiva insuficiente”, não tem lugar no modelo walrasiano, que assume que todos os mercados sempre se ajustam automaticamente.

Esta crítica teve implicações profundas para a teoria económica, levando ao desenvolvimento de modelos macroeconómicos que incorporam rigidezes de preços e falhas de coordenação – aspetos ignorados pela formulação original de Walras.

2.4. Teorias Contemporâneas de Equilíbrio e Desequilíbrio

Diante das limitações da teoria walrasiana, diversos economistas desenvolveram abordagens alternativas para modelar a dinâmica dos mercados.

Entre as mais influentes estão:

1. **Teoria dos Mercados Descentralizados:** Inspirada nos trabalhos de Hayek e Kirman, esta abordagem sugere que mercados operam como sistemas dinâmicos nos quais agentes aprendem e ajustam os seus comportamentos ao longo do tempo. Modelos de aprendizagem adaptativa e redes neurais têm sido usados para estudar como preços emergem em mercados descentralizados sem um leiloeiro central (Tesfatsion & Judd, 2006);



2. Economia Computacional e Agentes Heterogêneos: Em contraste com o modelo walrasiano, que assume agentes homogêneos e plenamente racionais, a economia computacional modela agentes heterogêneos com regras de decisão adaptativas. Trabalhos como os de W. Brian Arthur (1994) demonstraram que os mercados podem exibir padrões complexos de flutuação de preços e ciclos de instabilidade devido à interação entre agentes inteligentes que utilizam algoritmos de aprendizagem de máquina;

3. Teoria das Finanças Comportamentais: A hipótese de mercados eficientes, baseada no equilíbrio geral, foi fortemente contestada por economistas como Robert Shiller (2003), que mostrou que os mercados financeiros frequentemente exibem bolhas e crises que não podem ser explicadas pelo modelo walrasiano. A economia comportamental, baseada nas descobertas de Daniel Kahneman e Amos Tversky (1979), sugere que os agentes económicos são frequentemente irracionais e influenciados por vieses cognitivos, o que leva a ineficiências de mercado sistemáticas.



Conclusão

As críticas à teoria do equilíbrio geral são numerosas e profundas, variando desde a impossibilidade computacional do tâtonnement até questionamentos fundamentais sobre a natureza da informação e da racionalidade económica.

Enquanto a visão walrasiana propõe um modelo ordenado e matematicamente elegante da economia, a realidade dos mercados sugere um processo dinâmico e muitas vezes caótico, no qual agentes descentralizados aprendem e se adaptam a condições em constante mudança.

No século XXI, o avanço da inteligência artificial e dos mercados algorítmicos trouxe novos desafios e oportunidades para a teoria económica, reabrindo o debate sobre a viabilidade do equilíbrio geral.

O próximo capítulo explorará como a IA está a transformar os mercados e se essa transformação reforça ou invalida as suposições walrasianas.



Capítulo 3 – A Inteligência Artificial e a Nova Economia Digital

A ascensão da inteligência artificial (IA) e da economia digital tem provocado mudanças estruturais nos mercados, alterando a forma como os preços são determinados, transações são realizadas e agentes económicos interagem.

A teoria do equilíbrio geral de Léon Walras, concebida para um mundo de trocas descentralizadas entre agentes racionais e bem informados, enfrenta desafios inéditos num ambiente onde os algoritmos tomam decisões em tempo real, aprendem com grandes volumes de dados e influenciam dinâmicas de mercado antes governadas exclusivamente por humanos.

Este capítulo examina os impactos da IA e da digitalização na economia sob três perspetivas principais: a reconfiguração dos mercados digitais, a automatização da descoberta de preços e as novas formas de coordenação económica.

Ao explorar estes temas, investigamos se a lógica walrasiana do equilíbrio geral permanece válida na era da inteligência artificial ou se novas abordagens teóricas são necessárias para compreender a economia digital contemporânea.

3.1. A Economia Digital e a Descentralização das Trocas

A economia digital caracteriza-se pela desmaterialização das trocas, pelo surgimento de plataformas que conectam produtores e consumidores globalmente e pela automatização de processos de mercado.

Diferente da economia tradicional, onde a interação entre agentes ocorre predominantemente em mercados físicos ou instituições financeiras centralizadas, a economia digital opera por meio de redes distribuídas que desafiam algumas das premissas da teoria walrasiana.

Entre as principais características da nova economia, destacam-se:

- **Mercados Baseados em Plataformas:** Empresas como a Amazon, a Alibaba e a Uber criam ecossistemas nos quais preços, oferta e procura são ajustados dinamicamente por algoritmos. Diferente do tâtonnement walrasiano, os preços nestes mercados são frequentemente personalizados, baseados em dados preditivos e ajustados em tempo real para maximizar receitas e capturar elasticidades de procura individuais (Edelman & Wright, 2015);

- **Desintermediação e Contratos Inteligentes:** Com a introdução da tecnologia blockchain e de contratos inteligentes, as transações podem ser realizadas sem a necessidade de intermediários tradicionais, reduzindo fricções informacionais e custos de transação (Catalini & Gans, 2020). Este modelo desafia a visão walrasiana de mercados centralizados e regulados por um leiloeiro, permitindo uma coordenação mais descentralizada e baseada em protocolos automáticos;
- **Economia da Atenção e Modelos de Precificação Dinâmica:** Ao contrário do pressuposto de informação perfeita, agentes na economia digital enfrentam sobrecarga informacional, e as decisões são influenciadas por algoritmos que personalizam recomendações e anúncios (Goldfarb & Tucker, 2019). Isso leva a mercados nos quais os preços não refletem apenas custos e preferências, mas também estratégias de envolvimento e otimização algorítmica.

Diante destas transformações, a pergunta central torna-se: a IA e a digitalização reforçam ou invalidam as premissas da teoria do equilíbrio geral?



3.2. Inteligência Artificial e a Automatização da Descoberta de Preços

Na teoria walrasiana, a descoberta de preços ocorre por meio de um mecanismo de tâtonnement, no qual um leiloeiro ajusta os preços até que a oferta e a procura se igualem em todos os mercados simultaneamente.

Este processo sempre foi considerado uma idealização matemática, pois, na prática, os mercados operam por meio de interações descentralizadas entre agentes humanos.

A inteligência artificial introduz um novo paradigma: a precificação algorítmica, em que sistemas de machine learning ajustam automaticamente os preços com base em dados em tempo real.

Este modelo é amplamente utilizado em setores como:

- **Mercados Financeiros:** A maioria das transações em bolsas de valores é hoje realizada por algoritmos de alta frequência (high-frequency trading), que detetam padrões de preços e realizam milhares de ordens por segundo (Kirilenko et al., 2017). Este modelo levanta questões sobre a estabilidade dos mercados, pois a interação entre algoritmos pode levar a flutuações extremas e a volatilidade não prevista pelos modelos de equilíbrio geral;

- **Precificação Dinâmica em Plataformas Digitais:** Empresas como a Uber e a Amazon ajustam preços automaticamente com base na procura em tempo real. Diferente do equilíbrio geral, onde os preços são determinados por condições de mercado estáveis, a IA cria um sistema onde a precificação se torna um processo dinâmico e autoajustável, que pode divergir significativamente da teoria neoclássica tradicional (Chen et al., 2016);
- **Monopólios Algorítmicos e Colusão Artificial:** Outra consequência da IA na economia é a capacidade dos algoritmos aprenderem a coordenar preços de forma tácita, sem necessidade de comunicação explícita entre empresas. Estudos empíricos sugerem que a aprendizagem algorítmica pode resultar em padrões de precificação que imitam comportamentos colusivos, reduzindo a concorrência e desafiando a premissa walrasiana de mercados competitivos (Calvano et al., 2020).

Diante deste cenário, a noção clássica de preços ajustando-se automaticamente até um equilíbrio parece ser substituída por um novo modelo, em que os algoritmos criam dinâmicas de mercado instáveis e altamente reativas.

3.3. Novas Formas de Coordenação Económica e a Superação do Equilíbrio Geral

Se a teoria de Walras pressupunha um mercado onde agentes descentralizados coordenam as suas decisões por meio do sistema de preços, a IA e a digitalização introduzem novas formas de coordenação que vão além da lógica do equilíbrio geral.

Algumas destas novas formas incluem:

- 1. Coordenação Baseada em Redes e IA Distribuída:** A crescente interconectividade dos agentes económicos e a disseminação de IA distribuída sugerem que os mercados podem ser melhor compreendidos como sistemas complexos adaptativos, onde padrões emergem sem um ponto de equilíbrio estático (Arthur, 1994). Modelos baseados em redes neurais e aprendizagem de reforço estão a ser utilizados para entender como as economias se auto-organizam sem depender da hipótese walrasiana de um estado de equilíbrio único e estável (Rahwan et al., 2019);

2. Criptomoedas e Mercados Descentralizados: A ascensão das criptomoedas e das finanças descentralizadas (DeFi) introduz um modelo de mercado onde regras de precificação e liquidez são determinadas por protocolos algorítmicos em vez de agentes humanos tradicionais. Em vez de mercados convergindo para um equilíbrio, temos sistemas em constante reconfiguração, regulados por incentivos codificados em contratos inteligentes (Buterin, 2014);

3. Intervenção de IA na Macroeconomia: Modelos macroeconómicos tradicionais baseados em equilíbrio geral frequentemente falham em capturar choques e instabilidades. A IA aplicada à política económica pode permitir novos mecanismos de regulação, nos quais políticas monetárias e fiscais são ajustadas dinamicamente por algoritmos que detetam padrões económicos emergentes (Agarwal & Gans, 2021).

Estas mudanças sugerem que a economia digital altera a forma como os mercados funcionam, mas também pode exigir uma revisão fundamental dos modelos teóricos usados para analisá-los.



Conclusão

A revolução da inteligência artificial e da economia digital representa um desafio significativo para a teoria do equilíbrio geral de Walras.

Num mundo onde os preços são ajustados dinamicamente por algoritmos, mercados operam em redes distribuídas e agentes interagem com inteligência artificial, a visão clássica de equilíbrio estático parece cada vez mais inadequada.

O avanço da IA sugere que a economia deve ser vista não como um sistema que converge para um estado de equilíbrio, mas como um sistema dinâmico e adaptativo, onde agentes inteligentes moldam mercados de formas imprevisíveis.

No próximo capítulo, exploraremos se a IA e a digitalização representam a superação definitiva da teoria walrasiana ou se há formas de reformulá-la para o século XXI.



Capítulo 4 – Relevância e Limitações da Teoria Walrasiana na Era da Inteligência Artificial

A teoria do equilíbrio geral de Léon Walras sempre ocupou um lugar central na economia neoclássica.

A sua ambição de descrever a economia como um sistema matematicamente estruturado, no qual os mercados alcançam um equilíbrio simultâneo, influenciou gerações de economistas e serviu de base para modelos económicos modernos.

No entanto, a ascensão da inteligência artificial (IA) e da economia digital colocou em causa várias das suas premissas fundamentais, levantando a questão central deste capítulo: a teoria walrasiana ainda é relevante para entender a economia contemporânea, ou a revolução da IA exige um novo paradigma? Para responder a esta questão, exploraremos tanto os aspetos da teoria walrasiana que permanecem válidos como as suas limitações diante da nova realidade económica.



4.1. A Persistência da Lógica Walrasiana na Economia Digital

Apesar das profundas transformações económicas impulsionadas pela IA, alguns elementos centrais da teoria walrasiana continuam relevantes.

De fato, a própria lógica da inteligência artificial e dos algoritmos de precificação frequentemente se alinha a certos princípios do equilíbrio geral, mesmo que de forma modificada.

4.1.1. Modelagem Matemática e a Formalização da Economia

Uma das maiores contribuições de Walras foi a formalização matemática da economia como um sistema de equações simultâneas, permitindo análises rigorosas da interação entre mercados.

Esse aspeto permanece extremamente relevante, pois a economia digital depende de modelos matemáticos sofisticados para prever o comportamento de consumidores, otimizar preços e desenvolver mercados algorítmicos.

- **Algoritmos de aprendizagem de máquina e otimização de mercados:** Modelos baseados em inteligência artificial frequentemente utilizam métodos matemáticos semelhantes aos da teoria walrasiana para encontrar soluções de equilíbrio em mercados complexos. Por exemplo, redes neurais profundas e aprendizagem de reforço são utilizados para prever preços e ajustar automaticamente a oferta e procura em plataformas digitais (Bertsimas & Kallus, 2020);
- **Mercados financeiros e equilíbrio computacional:** Nos mercados financeiros, modelos inspirados no equilíbrio geral ainda desempenham um papel importante. Os modelos de equilíbrio de Arrow-Debreu continuam a ser a base para o desenvolvimento de algoritmos de precificação de ativos e gestão de risco (Cochrane, 2005).

4.1.2. A Organização dos Mercados e a Coordenação dos Agentes

Outro ponto de resiliência da teoria walrasiana é a sua ênfase na coordenação descentralizada de agentes por meio do sistema de preços.



Embora a IA tenha introduzido novas dinâmicas, a ideia de que mercados podem atingir uma forma de equilíbrio por meio da interação de múltiplos agentes continua a ser uma ferramenta conceitual útil:

- **Plataformas digitais como aproximações do equilíbrio geral:** Empresas como a Amazon, a Uber e a Google utilizam a IA para ajustar preços, otimizar stocks e gerir cadeias de abastecimento de forma automatizada. O princípio subjacente a estas práticas ainda reflete a lógica walrasiana: encontrar preços que equilibrem oferta e procura em tempo real (Edelman & Wright, 2015);
- **Inteligência artificial e leilões computacionais:** Modelos de leilão utilizados em publicidade online, como os do Google Ads e do Facebook, seguem uma lógica semelhante ao tâtonnement walrasiano, onde algoritmos ajustam preços automaticamente para maximizar a eficiência de mercado (Varian, 2007).

Desta forma, a visão de Walras sobre mercados interligados ainda fornece uma estrutura útil para entender a economia digital, mesmo que a sua implementação ocorra de forma mais dinâmica e computacionalmente intensiva.

4.2. As Limitações da Teoria Walrasiana na Era da IA

Apesar da sua resiliência conceitual, a teoria do equilíbrio geral enfrenta desafios significativos na era da inteligência artificial.

As suas principais limitações decorrem da rigidez das suas premissas, que não se adaptam facilmente a um mundo económico em que os agentes são algoritmos, a informação é processada em larga escala e os mercados são altamente dinâmicos.

4.2.1. Informação Perfeita vs. Assimetria e Manipulação Algorítmica

Walras pressupunha que todos os agentes económicos têm acesso à mesma informação e que os preços refletem com precisão todas as condições do mercado.

No entanto, a IA transformou a economia num ambiente caracterizado por assimetria informacional extrema e manipulação algorítmica dos preços;

- **Personalização de preços e discriminação algorítmica:** Diferente do equilíbrio geral, onde um único preço de equilíbrio emerge para todos os consumidores, os algoritmos modernos ajustam preços de forma individualizada com base em dados comportamentais (Acquisti & Varian, 2005), o que gera mercados onde os consumidores não enfrentam as mesmas condições, violando a ideia de equilíbrio único;

- **Monopólios digitais e opacidade dos mercados:** Grandes plataformas como a Google, a Amazon e o Facebook concentram informação e utilizam a IA para maximizar o seu controlo sobre o mercado. Isso gera distorções que não são previstas pela teoria walrasiana, que pressupõe mercados competitivos (Zuboff, 2019).

4.2.2. O Equilíbrio Geral Não Considera Dinâmicas de Aprendizagem e Adaptação

Outra limitação importante da teoria walrasiana na era da IA é a sua visão estática dos mercados.

No modelo tradicional, os preços ajustam-se automaticamente até atingir um ponto de equilíbrio.

No entanto, mercados modernos operam de forma dinâmica e evolutiva, onde algoritmos aprendem e ajustam o seu comportamento continuamente:

- **IA e comportamento estratégico adaptativo:** Algoritmos modernos não são agentes passivos esperando um preço de equilíbrio; eles aprendem e ajustam estratégias dinamicamente, o que pode levar a ciclos de feedback, instabilidades e padrões emergentes não previstos pelo equilíbrio geral (Rahwan et al., 2019);

- **Colusão algorítmica e coordenação implícita:** Diferente do equilíbrio competitivo de Walras, onde os agentes maximizam lucros de forma independente, a IA pode levar à colusão algorítmica, onde as empresas ajustam preços sem comunicação explícita, dificultando a regulação da concorrência (Calvano et al., 2020).

4.2.3. A Inviabilidade Computacional do Equilíbrio Walrasiano

Como discutido no Capítulo 2, a prova formal do equilíbrio geral por Arrow e Debreu (1954) depende de suposições matemáticas idealizadas, como convexidade de preferências e ausência de retornos crescentes de escala.

Estas condições raramente se aplicam à economia digital, que é caracterizada por efeitos de rede, retornos crescentes e mercados descentralizados a operar em tempo real:

- **Inteligência artificial como alternativa ao leiloeiro walrasiano:** Diferente do modelo de tâtonnement, onde os preços se ajustam mecanicamente, a IA permite processos descentralizados de aprendizagem e ajuste de preços que não precisam convergir para um equilíbrio único (Tesfatsion & Judd, 2006);

Desta forma, o modelo walrasiano falha ao capturar a complexidade dos mercados modernos, onde múltiplos equilíbrios podem coexistir e onde os agentes adaptam constantemente o seu comportamento em resposta a novas informações.

Conclusão

A teoria do equilíbrio geral de Walras continua a ser um marco na economia, fornecendo um pensamento matemático essencial para modelagem de mercados.

No entanto, a revolução da inteligência artificial expôs as suas limitações, especialmente no que diz respeito à assimetria de informação, à adaptação estratégica de algoritmos e à dinâmica emergente dos mercados digitais.

Embora elementos da teoria walrasiana ainda sejam utilizados, é necessário um novo paradigma que integre conceitos da economia computacional, da teoria dos sistemas complexos e da inteligência artificial.

No próximo capítulo, exploraremos possíveis caminhos para uma nova teoria económica que substitua ou complemente o modelo de equilíbrio geral na era da IA.



Capítulo 5 – Implicações para a Teoria Económica e Política Económica

A ascensão da inteligência artificial (IA) e da economia digital desafia a teoria do equilíbrio geral de Walras, mas também levanta questões fundamentais sobre o papel da política económica e a necessidade de um novo quadro teórico para compreender e regular mercados altamente dinâmicos.

Se, por um lado, a modelagem matemática walrasiana ainda fornece conhecimento sobre a coordenação económica, por outro, a realidade digital exige um afastamento das premissas da informação perfeita, racionalidade absoluta e equilíbrio estático.

Este capítulo examina as implicações da IA e da digitalização para a teoria económica e a formulação de políticas públicas.

Primeiro, analisamos como a revolução algorítmica exige novas abordagens teóricas para modelar mercados e agentes.

Em seguida, exploramos como os governos e instituições podem repensar as suas estratégias de regulação e política económica para lidar com um ambiente de mercados cada vez mais automatizados e descentralizados.

5.1. O Futuro da Teoria Económica: Da Estática Walrasiana à Dinâmica Computacional

A teoria económica tradicional baseia-se na ideia de que os mercados convergem para um estado de equilíbrio. Este pressuposto, que permeia desde Walras até os modelos neoclássicos de crescimento económico, entra em conflito com a natureza evolutiva e adaptativa dos mercados digitais, onde algoritmos de IA ajustam preços e estratégias de forma contínua.

5.1.1. Sistemas Complexos e a Superação da Noção de Equilíbrio Estático

Em vez de considerar os mercados como sistemas que procuram um único ponto de equilíbrio, muitos economistas argumentam que eles devem ser vistos como sistemas complexos adaptativos, onde múltiplos equilíbrios são possíveis e as interações entre agentes geram padrões emergentes (Arthur, 1994):

- **Teoria dos Sistemas Complexos:** Brian Arthur (1999) argumenta que a economia moderna se assemelha mais a um sistema dinâmico não linear do que a um conjunto de equações de equilíbrio. Agentes dotados de IA aprendem e ajustam as suas estratégias em tempo real, tornando a convergência para um equilíbrio único improvável;

- **Aprendizagem de Máquina e Equilíbrios Evolutivos:** Modelos baseados em aprendizagem de máquina sugerem que os mercados podem seguir trajetórias de evolução contínua em vez de atingir um equilíbrio fixo. Isto leva a uma reavaliação dos modelos económicos, que precisam incorporar adaptação e aprendizagem algorítmica nas suas formulações (Rahwan et al., 2019).

Assim, em vez de insistir na ideia de um equilíbrio geral, a teoria económica deve avançar para modelos de equilíbrio dinâmico, inspirados na teoria do caos, na inteligência artificial e na simulação computacional.

5.1.2. Economia Computacional e Modelos Baseados em Agentes

A introdução da IA na economia também sugere que modelos computacionais podem substituir, ou pelo menos complementar, os modelos tradicionais de equilíbrio geral:

- **Modelos Baseados em Agentes (ABM - Agent-Based Models):** Ao invés de pressupor um mercado que procura equilíbrio, os ABMs simulam economias como sistemas de agentes heterogéneos que interagem de forma descentralizada. Isso permite capturar efeitos emergentes impossíveis de prever em modelos de equilíbrio tradicional (Tesfatsion & Judd, 2006);

- **Simulações Computacionais e Machine Learning:** Em vez de resolver um sistema de equações, a economia pode adotar métodos como redes neurais para prever dinâmicas de mercado sem a necessidade de pressupor um equilíbrio estático (LeBaron, 2006).

Estas mudanças exigem uma reformulação dos fundamentos da teoria económica, deslocando o foco do equilíbrio geral para a análise de dinâmicas emergentes e adaptativas.

5.2. Política Económica na Era da Inteligência Artificial

Se a teoria económica precisa de se adaptar à nova realidade digital, o mesmo se aplica à política económica.

Os Reguladores enfrentam desafios inéditos diante da ascensão da IA, que não só automatiza mercados, mas também reconfigura o poder económico, a distribuição de riqueza e os mecanismos tradicionais de governança.

5.2.1. Regulação de Mercados Algorítmicos e o Problema da Transparência

Uma das principais dificuldades da política económica contemporânea é a regulação de mercados controlados por algoritmos.

Diferente dos mercados tradicionais, onde a concorrência é regulada por leis antitruste e supervisão estatal, os mercados digitais operam sob regras determinadas por inteligência artificial, muitas vezes sem transparência para os consumidores e os reguladores:

- **Colusão Algorítmica:** Como discutido no Capítulo 3, os algoritmos podem aprender a coordenar preços de forma tácita, prejudicando a concorrência sem a necessidade de comunicação explícita entre empresas (Calvano et al., 2020). Isso exige novas abordagens regulatórias baseadas na auditoria de IA e no uso de algoritmos públicos para monitorar mercados digitais;
- **Monopólios Digitais e Poder de Mercado:** Grandes plataformas tecnológicas, como a Google, a Amazon e a Meta, utilizam a IA para consolidar o seu domínio de mercado, levantando questões sobre abuso de poder económico e barreiras à entrada de novos concorrentes (Zuboff, 2019). Os Governos podem precisar de reformular as políticas antitruste para lidar com mercados onde a vantagem competitiva não se baseia apenas no tamanho da empresa, mas também na superioridade dos seus algoritmos.



5.2.2. Políticas de Redistribuição e o Impacto da IA no Trabalho

A automatização impulsionada pela IA também tem implicações profundas para a política económica, especialmente no que diz respeito ao mercado de trabalho e à distribuição de rendimentos:

- **Desemprego Tecnológico e Novos Modelos de Rendimento Básico:** A substituição de trabalhadores humanos por inteligência artificial em setores como o retalho, os serviços financeiros e a manufatura levanta a possibilidade de aumento do desemprego estrutural. Isto tem levado alguns economistas a considerar políticas como o rendimento básico universal (RBU) para garantir um mínimo de segurança económica à população (Autor, 2015);
- **Educação e Requalificação Profissional:** Em vez de apenas mitigar os efeitos negativos da automatização, os governos podem investir em políticas ativas de requalificação, garantindo que a força de trabalho esteja preparada para atuar num ambiente dominado por IA (Brynjolfsson & McAfee, 2014).

A política económica do século XXI precisará equilibrar inovação tecnológica com a inclusão social, garantindo que a IA beneficie a sociedade como um todo, e não apenas as empresas que dominam os mercados digitais.

Conclusão

A teoria económica e a política económica estão num momento de transição profunda.

A IA e a economia digital desafiam o modelo tradicional de equilíbrio geral, exigindo novas abordagens baseadas em sistemas complexos, aprendizagem de máquina e modelos computacionais.

Ao mesmo tempo, os formuladores de políticas enfrentam desafios inéditos relacionados com a regulação de mercados algorítmicos, monopólios digitais e impactos da automatização no trabalho.

Diante deste cenário, economistas e reguladores precisam de abandonar a visão estática da economia e adotar uma abordagem dinâmica, reconhecendo que os mercados digitais não convergem necessariamente para um equilíbrio, mas evoluem de forma contínua. O futuro da teoria económica dependerá da sua capacidade de integrar conceitos de inteligência artificial, ciência de dados e sistemas adaptativos, construindo um novo paradigma que vá além das limitações do modelo walrasiano.

Conclusão – A Teoria Walrasiana na Era da Inteligência Artificial: Superação ou Adaptação?

A teoria do equilíbrio geral de Léon Walras foi um dos pilares fundamentais da economia neoclássica, oferecendo um modelo matemático sofisticado para descrever a interação entre mercados.

No entanto, a ascensão da inteligência artificial (IA) e da economia digital coloca em causa as suas premissas centrais, levantando a questão: a teoria walrasiana ainda é válida ou deve ser superada por um novo paradigma económico?

Ao longo deste ensaio, analisámos como a economia digital e a IA desafiam os conceitos clássicos de equilíbrio, racionalidade e informação perfeita.

Embora alguns princípios walrasianos ainda sejam relevantes na modelagem de mercados algorítmicos, a economia moderna exige uma abordagem mais dinâmica, capaz de capturar a complexidade e a evolução constante dos sistemas económicos contemporâneos.



1. Persistência e Adaptação da Teoria Walrasiana

Apesar das mudanças radicais impulsionadas pela IA, certos aspectos da teoria do equilíbrio geral continuam a ser úteis, especialmente na formalização matemática da economia e na modelagem de interações entre agentes.

A lógica do tâtonnement walrasiano, por exemplo, encontra eco nos algoritmos que ajustam preços em tempo real em plataformas digitais (Varian, 2007).

Além disso, a economia computacional ainda se apoia em modelos inspirados na teoria do equilíbrio geral para construir simulações de mercado e prever dinâmicas macroeconómicas (Tesfatsion & Judd, 2006).

Dessa forma, Walras não deve ser descartado por completo, mas reinterpretado dentro do contexto digital.

No entanto, esta adaptação tem limites.

A teoria walrasiana pressupõe mercados transparentes, agentes com informações completas e racionalidade perfeita – condições que raramente se verificam na realidade da economia digital.

A ascensão de algoritmos inteligentes introduz novas assimetrias de informação, dinâmicas estratégicas e instabilidades que o equilíbrio geral não consegue capturar plenamente.

2. As Limitações do Equilíbrio Geral e a Necessidade de um Novo Paradigma

Os desafios enfrentados pela teoria walrasiana na era da IA derivam das suas premissas idealizadas, que não se aplicam facilmente a um ambiente de mercados dinâmicos e algoritmos adaptativos.

Entre as principais limitações destacadas neste ensaio, estão:

- **Assimetria de informação e manipulação algorítmica:** Diferente da suposição de mercados transparentes, a IA possibilita estratégias de precificação personalizadas e a manipulação da informação de mercado, como observado na colusão algorítmica e nos monopólios digitais (Calvano et al., 2020; Zuboff, 2019);
- **Racionalidade limitada e comportamento estratégico de algoritmos:** Agentes humanos já não operam sozinhos nos mercados; algoritmos de IA aprendem e ajustam estratégias de forma contínua, o que gera padrões emergentes imprevisíveis e desestabiliza qualquer conceito estático de equilíbrio (Rahwan et al., 2019);
- **Inviabilidade computacional do equilíbrio geral:** A própria existência de um equilíbrio único e estável é questionável, especialmente em mercados com efeitos de rede e aprendizagem algorítmica, onde múltiplos equilíbrios podem coexistir e se modificar ao longo do tempo (Arthur, 1994).

Estes desafios indicam que a economia precisa de avançar para modelos mais flexíveis e dinâmicos, como aqueles baseados em sistemas complexos, aprendizagem de máquina e simulações computacionais.

3. O Futuro da Teoria e da Política Económica

O que substituirá a teoria walrasiana?

Uma resposta definitiva ainda não existe, mas algumas direções já se tornam evidentes:

- **Modelos Baseados em Agentes e Sistemas Complexos:** Em vez de um equilíbrio estático, a economia digital deve ser compreendida como um sistema adaptativo, onde múltiplos agentes interagem de forma descentralizada e geram padrões emergentes (Tesfatsion & Judd, 2006);
- **Aprendizagem de Máquina na Modelagem Económica:** Métodos estatísticos e redes neurais podem substituir equações de equilíbrio como a principal ferramenta preditiva da economia, permitindo modelos mais realistas e menos dependentes de pressupostos simplificadores (LeBaron, 2006);

Estes desafios indicam que a economia precisa de avançar para modelos mais flexíveis e dinâmicos, como aqueles baseados em sistemas complexos, aprendizagem de máquina e simulações computacionais.

3. O Futuro da Teoria e da Política Económica

O que substituirá a teoria walrasiana?

Uma resposta definitiva ainda não existe, mas algumas direções já se tornam evidentes:

- **Modelos Baseados em Agentes e Sistemas Complexos:** Em vez de um equilíbrio estático, a economia digital deve ser compreendida como um sistema adaptativo, onde múltiplos agentes interagem de forma descentralizada e geram padrões emergentes (Tesfatsion & Judd, 2006);
- **Aprendizagem de Máquina na Modelagem Económica:** Métodos estatísticos e redes neurais podem substituir equações de equilíbrio como a principal ferramenta preditiva da economia, permitindo modelos mais realistas e menos dependentes de pressupostos simplificadores (LeBaron, 2006);

- **Política Económica Baseada em Regulação Algorítmica:** A regulação dos mercados digitais exigirá novas abordagens para lidar com a colusão algorítmica, monopólios digitais e o impacto da IA no trabalho. Modelos tradicionais de regulação precisarão de ser atualizados para incorporar mecanismos de auditoria de IA e políticas redistributivas inovadoras (Brynjolfsson & McAfee, 2014).

Assim, o futuro da teoria económica depende da sua capacidade de integrar a revolução da IA nos seus fundamentos, substituindo a visão estática do equilíbrio geral por uma abordagem dinâmica e computacional.



Conclusão Final: Superação ou Síntese?

A teoria do equilíbrio geral de Walras, apesar das suas limitações, não deve ser descartada completamente.

Como argumenta Thomas Kuhn (1962), a ciência evolui por meio de mudanças de paradigma, mas raramente abandona completamente os conceitos anteriores – em vez disso, eles são reformulados e incorporados em novas estruturas teóricas.

O desafio, portanto, não é apenas rejeitar Walras, mas compreender quais aspetos da sua teoria ainda são úteis e como eles podem ser integrados num novo paradigma económico adequado à era da inteligência artificial.

Se a economia digital é um sistema dinâmico e adaptativo, o seu estudo exigirá ferramentas que vão além das equações de equilíbrio e incorporem métodos computacionais, inteligência artificial e ciência de sistemas complexos.

A teoria económica do futuro não será apenas uma extensão da teoria walrasiana – será uma síntese entre a matemática do equilíbrio, a complexidade da IA e a imprevisibilidade dos mercados digitais.

Apenas por meio desta síntese será possível compreender e regular uma economia onde os agentes já não são apenas humanos, mas também algoritmos inteligentes que aprendem, evoluem e transformam continuamente o mundo económico.

Walras

