



Febrero 2019 - ISSN: 1696-8352

PROGRESSO TECNOLÓGICO, MEIO AMBIENTE E BEM-ESTAR: ABORDAGEM TEÓRICA DOS MODELOS DINÂMICOS DE CRESCIMENTO

Geovânia Silva de Sousa¹
Elaine Aparecida Fernandes²
Evaldo Henrique da Silva³

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Geovânia Silva de Sousa, Elaine Aparecida Fernandes y Evaldo Henrique da Silva (2019): "Progreso tecnológico, meio ambiente e bem-estar: abordagem teórica dos modelos dinâmicos de crescimento", Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana, (febrero 2019). En línea:

<https://www.eumed.net/rev/oel/2019/02/modelos-dinamicos-crecimiento.html>

Resumo

Ao longo dos anos o mundo tem passado por uma série de mudanças que influenciam diretamente tanto a dinâmica das economias, como acarretam transformações ao meio ambiente, na maioria das vezes danosas. Assim, a forma como os recursos vinham sendo explorados e a preocupação com os limites que tal situação poderia impor ao crescimento suscitou teorias que buscam evidenciar os mecanismos indutores do crescimento e suas nuances sobre o meio ambiente. Nessa perspectiva, o presente estudo apresenta a evolução teórica acerca do crescimento econômico e meio ambiente, perpassando pelos modelos de Harrod - Domar (1946) até o modelo MIND-RS (2010). Cada abordagem traz um elemento inovador denotando o avanço das abordagens, contribuindo, assim, para análises sistemáticas e tomadas de decisões capazes de redirecionar a trajetória da economia das nações minimizando, ou até mesmo impedindo a ocorrência de um colapso tanto das economias como da provisão de recursos pelo meio ambiente.

Palavras Chave: Crescimento econômico. Tecnologia. Meio Ambiente.

1. INTRODUÇÃO

A complexidade advinda do novo ciclo de globalização econômica, a abissal desigualdade econômica entre países e pessoas, a velocidade e força do capital impactam nas decisões políticas que afetam milhões de pessoas no planeta.

Esses impactos foram objeto de intensos debates internacionais nas Conferência de Estocolmo (1972), ECO- 92, Rio + 20 e a COP-21 de Paris em 2015, as quais, do ponto de vista econômico, reavivaram a discussão sobre os modelos econômicos e a

¹ Doutora em Economia Aplicada. Professora do DCEC/UESC. E-mail: gsilvadsousa@gmail.com

² Doutora em Economia Aplicada. Professora do DCEC/UFV. E-mail: elaineafdil@gmail.com

³ Doutor em Economia Industrial e Tecnologia. Professor do DCEC/UFV. E-mail: ehsilva@ufv.br

necessidade de harmonizar crescimento econômico, avanço tecnológico e preservação do meio ambiente, com o fito de preservar a espécie humana no planeta.

Nesse sentido, este artigo aborda a evolução teórica dos modelos econômicos dinâmicos que integram em suas análises variáveis tais como *spillovers* tecnológicos, questões relacionadas ao meio ambiente, e o comércio bilateral como fatores que buscam explicar o processo de crescimento econômico, as disparidades entre os países (nações pobres e nações ricas) bem como o desgaste gerado ao meio ambiente.

A partir do cotejo das ideias, o estudo demonstra que cada modelo contribuiu de forma seminal para a compreensão dos fatos e fenômenos econômicos que são sempre dinâmicos e desafiam uma permanente adequação dos postulados teóricos para aliar crescimento econômico, tecnologia e meio ambiente.

Isto posto, além desta introdução, este trabalho está dividido em outras duas seções. Na seção 2, a discussão centra-se nos modelos de crescimento: Harrod e Domar e o princípio da aceleração e a teoria do multiplicador econômico; Solow e a teoria da estabilidade do crescimento, Ramsey, Cass e Koopmans com a figura do planejador social e a maximização do Bem – Estar; Arrow, Uzawa, Romer, e Lucas que integram o conceito do *learning by doing* e os *spillovers* tecnológicos, Grossman e Helpman e Aghion e Howitt com os modelos "quality ladder", Xepapadeas que retoma o planejador social e insere o meio ambiente em suas análises, e finalizando a seção, a abordagem de Edenhofer *et al*; Leimbach e Baumstark que consideram os *spillovers* tecnológicos, as questões ambientais, e o comércio bilateral. Por fim, a seção 3, que expõe as considerações finais do trabalho.

2. EVOLUÇÃO TEÓRICA DOS MODELOS DINÂMICOS DE CRESCIMENTO

No decorrer dos séculos XV e XVIII, pode-se observar uma diversidade de transformações políticas e socioeconômicas, mudanças essas que deram origem à primeira Revolução Industrial, caracterizada pelo aumento da produção, da população e pelo acelerado processo de urbanização. A falta de planejamento dessa dinâmica foi marcada pelo uso predatório de recursos naturais. Nesse período, algumas economias experimentaram um século de crescimento sustentado com o enriquecimento dessas nações, enquanto outras permaneceram pobres. Tendo em vista essa divergência de crescimento, autores como Ramsey (1928), Harrod (1939), Domar (1946), Solow (1956), Arrow (1962), Cass (1965) Koopmans (1965), Uzawa (1965), Romer (1986, 1990), Lucas (1988), Grossman e Helpman (1991), Aghion e Howitt (1992), Edenhofer (2005) e Leimbach e Baumanstark (2010) buscaram investigar os mecanismos indutores do crescimento econômico das nações, e explicar o porquê das disparidades entre os países bem como integrar em suas análises as questões relacionadas ao meio ambiente.

2.1 Harrod e Domar: o princípio da aceleração e a teoria do multiplicador econômico

Uma das teorias seminais que buscaram investigar o crescimento econômico foi a de Harrod (1939) e Domar (1946). Observando a forma como determinadas forças influenciam na magnitude das variáveis macroeconômicas para ajustar o sistema econômico, os autores buscaram unir o princípio da aceleração⁴ e a teoria do multiplicador econômico para desenvolver uma teoria dinâmica.

No modelo Harrod-Domar (1946), o equilíbrio do sistema é garantido por sua dinamicidade. Tal dinamismo acontece na relação marginal produto-capital pela propensão marginal a poupar, ou seja, com base no aumento da oferta pelos investimentos e pela determinação da demanda agregada via multiplicador. Há uma única taxa que garante o crescimento equilibrado, todavia, inexistem mecanismos de garantia quanto à efetividade dessa taxa de crescimento, acarretando um crescimento instável.

Depreende-se do modelo Harrod-Domar que haverá uma oscilação no crescimento das economias entre períodos de crescimento vertiginoso e períodos de bruscas quedas do nível de atividade econômica, uma vez que, apesar de existir a possibilidade da obtenção de uma trajetória de crescimento estável, a independência das variáveis constitutivas da condição de equilíbrio torna essa possibilidade improvável. Somado a isso, tem-se que o efeito cumulativo dos desvios da taxa efetiva de crescimento com relação à taxa garantida acarreta instabilidade no crescimento.

A hipótese de crescimento instável, contudo, foi questionada por Solow (1956) e Trevor Swan (1956) sob o argumento de que uma economia pode atingir, no longo prazo, um crescimento estável desde que seja possível a substitutibilidade do fator capital por trabalho.

⁴Entende-se por Princípio da aceleração uma taxa de alteração da demanda no presente.

2.2 Solow: a teoria da estabilidade do crescimento

A abordagem teórica do crescimento feita por Solow-Swan (1956) mostra, com respaldo na poupança, no crescimento demográfico e no progresso tecnológico, a dinâmica de uma economia que busca atingir um estado de equilíbrio estável no longo prazo.

O modelo de crescimento de Solow parte do pressuposto de que a função de produção depende dos fatores capital⁵, trabalho e tecnologia. O pressuposto dos rendimentos constantes de escala indica que o tamanho de um sistema econômico, mensurado com base no número de trabalhadores efetivos, não afeta tanto a produção como quando considerado o capital por trabalhador. Assim, quando o capital é baixo, o trabalhador dispõe de pouco recurso para trabalhar, porém, visto que incidem sobre a acumulação de capital rendimentos decrescentes de escala, unidades adicionais de capital representarão ganhos significativos para a atividade produtiva (ROMER, 2011).

As variáveis capital, trabalho e tecnologia no modelo crescem a taxas constantes. Embora sejam considerados o crescimento populacional e a tecnologia, o estoque de capital constitui um fator preponderante para aumentar o produto total da economia (AGUIÓN, 1998). Quanto maior o estoque de capital, maior o produto. Esse produto é dividido entre consumo e investimento. Sendo capital e produto elevados, as taxas de investimento também serão altas, contudo, a depreciação será, da mesma forma, elevada. A fração do produto destinada para o investimento é exógena e constante. Assim, uma unidade de capital investido produz uma nova unidade de capital, havendo, em contrapartida, depreciação do capital existente.

Considerando o efeito da depreciação, o modelo de Solow pressupõe que os trabalhadores poupem uma taxa “s” constante de sua renda, pois sobre o efeito da depreciação, com o passar do tempo, essa taxa “s” constante desaparece, ou seja, o valor do capital e o da depreciação serão os mesmos, indicando que a economia chegou ao seu equilíbrio de longo prazo.

Dessa forma, sempre que o capital for escasso, sua produtividade será maior, conseqüentemente, os rendimentos também serão maiores, levando as pessoas a poupar mais do que o suficiente para cobrir a depreciação do capital acumulado, o que caracterizará um iminente crescimento econômico no curto prazo. Contudo, a atuação da lei dos rendimentos marginais decrescentes fará com que a renda cresça menos que o capital social, ou seja, a poupança passará a crescer a níveis mais baixos que a depreciação, até que chegue a um mesmo ponto - o ponto de estabilidade da economia.

No estado estacionário, o capital por trabalhador e a produção são constantes. Havendo, contudo, crescimento populacional, o número de trabalhador estará aumentando a uma taxa n , bem como o capital e a produção total, que também crescerão a uma taxa n , acarretando crescimento sustentável na produção. Somado a isso, uma elevação na taxa de crescimento de trabalhadores terá como consequência uma redução no nível de capital por trabalhador que, por conseguinte, provocará redução da produção por trabalhador. Com isso, países com maior crescimento populacional terão

⁵ Por capital, entende-se tanto capital humano como capital físico (AGUIÓN, 1998).

um menor PIB *per capita*. Tal comportamento tem sido usado para demonstrar a disparidade entre as nações (AGUION, 1998).

Outra forma de tentar explicar a discrepância entre os países, conforme Aguión (1998), é pelo progresso tecnológico. No modelo de Solow, a relação entre trabalho e capital é constante, assim, uma forma de expandir a capacidade produtiva e compensar o efeito dos rendimentos marginais decrescentes tem como base mudanças tecnológicas. Assim sendo, à medida que há um aperfeiçoamento da tecnologia disponível, acontecerá um aumento da eficiência da mão de obra. Isso implica que, mesmo não sendo alterado o número de trabalhadores, a produção por trabalhador poderá ser aumentada, gerando ganhos no processo produtivo. Portanto, ainda que a trajetória do crescimento seja determinada por parâmetros como taxa de poupança (s), depreciação (δ) e crescimento populacional (n), o único parâmetro capaz de afetar diretamente o crescimento é a taxa exógena de tecnologia. Sob esse prisma, somente o progresso tecnológico pode explicar as disparidades econômicas entre os países.

Ademais, o modelo de Solow suscita a possibilidade de convergência econômica entre países pobres e países ricos. Segundo Solow, uma economia pobre, com menor estoque de capital, crescerá muito mais rapidamente no sentido de alcançar o estado estacionário. E quando esta convergência acontecer, as economias terão o mesmo nível de capital, produto e consumo. Contudo, tendo diferentes taxas de poupança, as economias podem crescer em direção ao seu próprio estado estacionário.

A teoria da estabilidade do crescimento de Solow (1956), assim como outras teorias que abordam o crescimento econômico, deixou de considerar, segundo Romer (2011), as limitações ambientais. A exaustão dos recursos naturais não renováveis, explorados a altas taxas, como observou Hotteling (1931), instigou estudos de Solow (1974, 1986) e de Stiglitz (1974), cuja abordagem permeia o campo da disponibilidade dos recursos ambientais, de seus preços e dos limites que eles podem impor ao crescimento.

Solow (1974) foi motivado a descobrir o que a teoria econômica versava sobre a exaustão dos recursos naturais pela leitura de Hottelin (1931), o qual chamava atenção para a existência de regulação para a exploração de recursos exauríveis como os minerais e as florestas, apontando a necessidade da existência de um movimento de conservação.

O progresso técnico no modelo de Solow, que considera os limites ambientais, é mensurado pela relação entre as elasticidades de substituição do capital e a elasticidade de substituição do trabalho, de modo que, para que haja um aumento no progresso tecnológico é preciso um aumento no capital. Por sua vez, a redução do progresso tecnológico está relacionada à redução de mão de obra. Se não houver alteração na relação entre capital e trabalho ao longo do tempo, tem-se uma taxa Hicks neutral⁶.

A formação de capital, nesse modelo, depende das variáveis *per capita* capital, disponibilidade de recurso natural e consumo, além do crescimento populacional e do progresso

⁶ A taxa Hicks Neutral refere-se a mudanças feitas na função de produção seguindo determinadas condições de neutralidade econômica. Ou seja, a mudança é considerada neutra no sentido de Hicks se não afetar o equilíbrio entre trabalho e capital na função de produção do modelo Solow.

tecnológico, sendo condutora da economia para um crescimento equilibrado a taxa de consumo dos recursos naturais. Solow (1986) afirma que, mesmo com os recursos naturais tendendo ao declínio, pode existir crescimento sustentável se o progresso tecnológico for maior que o consumo dos bens ambientais. Assim, a inovação tecnológica nesse modelo permite que haja suprimento da demanda atual dos bens ambientais sem comprometer as gerações futuras.

Destarte, uma falha apresentada no modelo de Solow é que a taxa de poupança (investimento), conseqüentemente, a relação entre o consumo e rendimento, é exógena e constante. Os consumidores são incentivados a consumir uma parte de sua renda no presente e poupar outra parte para o consumo futuro. Vedando os consumidores de um comportamento maximizador de sua utilidade, a análise não permite discussão de como os incentivos afetam o desempenho da economia, ou seja, não dá para saber quais foram as mudanças no sistema econômico decorrentes das variações nas taxas de juros e alíquotas de impostos ou outras variáveis.

2.3 Ramsey, Cass e Koopmans: planejador social e a maximização do Bem-Estar

No sentido de sanar essa falha, Ramsey Cass Koopmans (1965) apresenta um modelo caracterizado pela maximização da Utilidade individual ou do bem-estar, resultando em uma poupança endógena. O cerne do modelo está em quanto do produto nacional deve ser destinado para o consumo de modo a maximizar a utilidade atual, e quanto deve ser poupado (e investido) de modo a aumentar a produção e o consumo futuro, portanto, produzir utilidade futura.

Com isso, o modelo de crescimento ótimo desenvolvido por Ramsey (1928), mais tarde refinado por Cass (1965) e Koopmans (1965), passou a considerar um planejador social que busca maximizar a utilidade individual ou o bem-estar coletivo, pela escolha entre o consumo ou a poupança. E, assim, como no modelo de Solow, tanto a poupança quanto o consumo são assumidos como dados, porém, a evolução do estoque de capital é determinada pela interação entre as maximizações de famílias e firmas em mercados competitivos. Contudo, o resultado, diferentemente do modelo de Solow-Suan (1956), foi uma taxa de poupança endógena.

O modelo desconsidera todas as imperfeições do mercado e todas as questões ligadas à heterogeneidade das famílias e suas ligações entre as gerações, dessa forma, o modelo fornece um caso de referência natural. Pressupõe que existe um número grande de famílias idênticas que cresce a uma taxa n . Cada membro das famílias oferta uma unidade de trabalho, e as famílias alocam capital, qualquer que seja, nas próprias firmas. Por simplificação, não existe depreciação, e as famílias dividem suas rendas em cada ponto do tempo entre consumo e poupança, de forma a maximizar suas utilidades ao longo do tempo. A função de utilidade das famílias é dada pela relação entre consumo de cada membro da família no tempo e o número médio de indivíduos presentes em cada família, ponderada por uma taxa de preferência temporal. Quanto maior o valor dessa taxa, menor é o consumo futuro das famílias, ou seja, as famílias irão preferir consumir no presente a poupar para o consumo futuro.

As firmas, por sua vez, empregam em cada ponto do tempo estoques de trabalho e capital, pagam pelos seus produtos marginais e vendem o produto resultante. A função de produção das

firmas depende dos fatores capital (K), trabalho (L) e tecnologia (T). Como a função de produção tem retornos constantes e o mercado é competitivo, as firmas recebem lucro zero.

A família representativa, então, maximiza sua satisfação sujeita à sua restrição orçamentária, considerando suas interações com as firmas. As firmas pagam pelo trabalho e pelo capital fornecido pelas famílias, e as famílias consomem os produtos gerados pelas firmas. Dessa forma, o nível de satisfação ou bem-estar da família representativa está ligado ao consumo de produtos sujeitos a restrição orçamentária, dada pelos ganhos obtidos por unidades de trabalho.

Entretanto, o modelo de Ramsey não leva em consideração os eventuais impactos do sistema produtivo e do consumo sobre o meio ambiente. A poluição causada pelo sistema produtivo pode, de fato, influenciar nos níveis de bem-estar dos indivíduos ou, no caso do modelo de Ramsey, pode influenciar o bem-estar da família representativa. No entanto, o nível de bem-estar calculado neste modelo depende exclusivamente do consumo de bens, que está intimamente ligado ao crescimento do produto, porém sem levar em consideração os impactos causados ao meio ambiente.

Assim, o modelo de Ramsey Cass Koopmans (1965) diferencia-se do modelo de Solow–Suan (1956) por apresentar a poupança como um fator endógeno ao sistema, determinada pela decisão dos agentes quanto à maximização da sua utilidade no presente ou no futuro.

2.4 Arrow, Uzawa, Romer, e Lucas: o conceito do *learning by doing* e os *spillovers* tecnológicos

Mesmo tendo o modelo de Ramsey apresentado argumentos esclarecedores acerca do crescimento, autores como Arrow (1962), Uzawa (1965), Romer (1986), Lucas (1988), Grossman e Helpman (1989) e Romer (1990) se sentiram motivados a investigar a origem do crescimento.

Nos modelos apresentados pelos autores supracitados, o crescimento passa a ser determinado por forças internas ao sistema, no qual as externalidades têm um papel fundamental e os rendimentos marginais do “fator acumulável” são tidos como constantes ou crescentes, garantindo, assim, um crescimento equilibrado de longo prazo. Para tanto, fatores como inovação tecnológica endógena, capital humano e os arranjos institucionais passam a integrar as análises do processo de crescimento.

Arrow (1962) interpreta a invenção como produção de conhecimento. Segundo o autor, o aprendizado é consequência do aumento do capital físico, uma vez que as firmas ao longo do processo produtivo buscam novas formas de produzir. Com isso, o conhecimento adquirido na profissão ou no desenvolvimento de um processo é considerado público e responsável pelo aumento do produto na economia. Assim, introduz o conceito do *learning by doing*, que é a base de sustentação para o modelo de crescimento endógeno de Romer (1986, 1990).

Uzawa (1965), por sua vez, associa o crescimento da tecnologia ao capital humano. Segundo o autor, para haver progresso tecnológico, são necessários serviços de trabalho na forma de insumos educacionais. Ademais, analisa trajetórias ótimas de crescimento, sem se preocupar com a estabilidade.

Lucas (1988) tomou como base o modelo de Uzawa (1965) para investigar a influência do capital humano no crescimento endógeno, observando trajetórias de estabilidade. Diferentemente do que acontecia no modelo de Solow (1956), em que o crescimento tecnológico exógeno era o responsável pelo crescimento sustentado, Lucas demonstra que a acumulação de capital humano pode resultar em um crescimento econômico sustentável. O autor defendeu a hipótese de que o capital humano aumenta a produtividade do trabalho, apontando a acumulação de capital físico como principal responsável pelo crescimento econômico.

O modelo prevê, segundo Barro e Sala-i-Martin (2003), que a superação de uma economia que teve grande parte do seu capital físico devastado por uma guerra é mais rápida do que a superação de uma epidemia que dizimou grande parte do capital humano. Então, se o capital físico é maior que o capital humano, a motivação maior será para alocar o capital humano no setor de bens ao invés de alocá-lo no setor de pesquisa, uma vez que sua produtividade é mais elevada nesse setor. Com isso, a taxa de crescimento da economia tende a ser reduzida.

A ideia básica do modelo é que as pessoas dividem seu tempo entre trabalho e treinamento, então, há, nesse caso, um trade off quando se considera que a formação pessoal consiste em abrir mão do seu rendimento presente para aumentar a produtividade futura, conseqüentemente, seu rendimento futuro.

Assim, quanto maior o nível de formação, maior a produtividade, conseqüentemente, maior será o aumento no produto do trabalho marginal que segue a formação e, portanto, maior a taxa de salário futuro. Isto significa que os incentivos à formação educacional são maiores e, assim, será também a taxa de crescimento da economia. Ou seja, quanto maior o ímpeto em elevar o nível de formação pessoal, menor o privilégio para os consumidores no presente em relação ao consumo futuro, mas os trabalhadores estarão dispostos a abandonar o consumo presente para dedicar-se à formação pessoal.

Dessa forma, para verificar a dinâmica do crescimento econômico, o modelo de Lucas é estruturado em um sistema de equações diferenciais capazes de refletir o comportamento das variáveis econômicas observadas no mundo real. Para tanto, ele integra, aos modelos de crescimento da época, a interação entre capital físico e humano e uma mudança tecnológica, a especialização do próprio capital humano através de aprendizagem em espécies diferentes (*learning-by-doing*), bem como a interação entre comércio e desenvolvimento, na pressuposição de que o bem-estar dos consumidores seja dado por uma função de utilidade intertemporal de elasticidade de substituição constante. Integra também, aos modelos de crescimento da época, a "eficácia" de formação, isto é, a taxa de aumento da produtividade da mão de obra, dada por uma unidade adicional de treinamento exógena.

Nesse sentido, inova em relação aos modelos anteriores ao considerar o aperfeiçoamento do capital humano como o indutor do crescimento, expondo a possibilidade de haver efeitos de transbordamentos (*spillovers*) de capital humano entre os diferentes países. A classe trabalhadora poderia agora ser dividida entre os capacitados e os não capacitados. A igualdade dos níveis de renda entre as nações passa a depender da relação entre os diversos países, podendo existir convergência entre os

dotados de maior capital humano, destarte, essas economias apresentariam os melhores níveis de renda.

Romer (1986, 1990) retoma o pensamento de Arrow (1962), que considera o aprendizado consequência do aumento do capital físico. Para elaboração do modelo, a economia foi dividida em três setores: o setor de pesquisa, que utiliza o capital humano e o estoque de conhecimento existente para produzir novos conhecimentos, resultando nas patentes; o setor de bens intermediários, que usa o conhecimento do setor de pesquisa na produção dos bens de capital; e o setor de bens finais, que usa trabalho, capital humano e o conjunto de produtos do setor de bens intermediários, podendo esta produção ser tanto consumida quanto estocada como novo capital. As variáveis básicas do modelo são capital, trabalho, capital humano e tecnologia.

Para que a análise dinâmica e os efeitos de interesse pudessem ser feitos e aferidos de modo mais simples, Romer (1990) promoveu algumas simplificações. A primeira simplificação considera a população e a oferta de trabalho constantes. A segunda considera fixos o estoque total de capital humano na população, a fração fornecida ao mercado também e, por consequência, a oferta agregada dos fatores mão de obra e capital humano. A terceira é que a análise dinâmica, nesse modelo, limita-se à análise de equilíbrios com taxas de crescimento constantes.

A produção final é expressa, no modelo, como uma função do trabalho, do capital humano e da quantidade de bens de capital, de modo que um dólar adicional de um bem intermediário não tem efeito sobre a produtividade marginal de outro bem intermediário usado na produção. O capital total da economia é mensurado pela diferença entre a produção total de bens e o consumo total.

Assume-se no modelo que o equilíbrio se baseia no pressuposto de que qualquer pessoa envolvida na pesquisa tem livre acesso a todo o estoque de conhecimento, e quanto maior a quantidade de capital humano direcionado para a pesquisa, maior a taxa de produção de novos projetos, e que quanto maior o estoque total de projetos e conhecimento, maior a produtividade do pesquisador.

A característica fundamental da especificação usada por Romer (1990) é que o conhecimento entra na produção de duas formas distintas. Um novo projeto pode desenvolver um produto que poderá ser utilizado na produção de bens finais. Ademais, pode também aumentar o estoque total de conhecimento⁷ e, assim, aumentar a produtividade do capital humano no setor de investigação. Isso porque o direito de propriedade relacionado a um novo projeto recai somente sobre o uso na produção, não havendo qualquer impedimento de uso no setor de pesquisa. Em nível agregado, o estoque de capital humano é somado ao capital físico, resultando no capital total envolvido no processo produtivo.

A demanda de produtos finais, por sua vez, mostra que o produtor de bens finais especializado toma o preço como dado na escolha da maximização de lucros. Uma empresa que já fez investimento em um projeto irá escolher um nível de produção capaz de maximizar seu lucro.

O custo é a despesa dos juros nas unidades de saída necessária para produzir os bens finais demandados. Para manter a análise simples, convencionou-se que o capital seja físico, de modo que

⁷O conhecimento é considerado um bem não rival, parcialmente excludente e privado.

a empresa possa resolver este problema em qualquer ponto do tempo. Somado a isso, a qualquer momento, o único custo recorrente é a despesa inicial no projeto. Essa suposição é inofensiva porque a demanda por bens duráveis é estacionária. A decisão de produzir uma nova entrada especializada depende de uma comparação do fluxo descontado da receita líquida e do custo do investimento inicial em um projeto. Isso porque o mercado de projetos é competitivo, e o preço para os projetos será licitado até que seja equivalente ao valor presente da receita líquida recebida por um monopolista.

O valor da receita em relação ao custo marginal deve ser suficiente para cobrir o custo dos juros sobre o investimento inicial em um projeto. A solução do modelo para atingir um crescimento equilibrado mostra que há uma relação linear negativamente inclinada entre a taxa de crescimento do produto e a taxa de retorno sobre o investimento, sendo, portanto, necessário especificar as preferências como uma relação paralela entre a taxa de crescimento do consumo e a taxa marginal de substituição intertemporal.

O autor pressupõe nesse modelo que a condição de otimização intertemporal seja implícita para o consumidor e confrontada com uma taxa de juros fixa; os consumidores são dotados de quantidades fixas de trabalho e capital humano, que são fornecidos inelasticamente; os consumidores têm empresas produtoras de bens duráveis existentes, e a receita líquida dessas empresas é paga para os consumidores na forma de dividendos. As empresas produtoras de bens finais recebem lucro zero (ROMER, 1990).

A análise do modelo de Romer (1990), de modo similar ao modelo de Solow, considera a mudança tecnológica um incentivo para a acumulação de capital, sendo essa mudança responsável pelo aumento da produção por hora trabalhada, e como em Uzawa (1965), a evolução da tecnologia é determinada pela alocação de recursos no setor de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e no setor de bens finais.

2.5 Grossman e Helpman e Aghion e Howitt: modelos "quality ladder"

Outros estudos como os Grossman e Helpman (1991) e Aghion e Howitt (1992) investigam os investimentos em P&D como a principal fonte de progresso tecnológico e do crescimento econômico. No modelo de Romer (1990), as ideias são incorporadas aos bens de capital que, em conjunto com o trabalho, resultam na produção final, e o progresso tecnológico se dá pelos *inputs* na produção. Os modelos "quality ladder" de Grossman e Helpman (1991) e Aghion e Howitt (1992) buscaram melhorar os inputs pela inovação, fixando um número de entradas de insumos no processo produtivo.

Grossman e Helpman (1991) observaram que os avanços tecnológicos são responsáveis pelo aumento da produtividade dos fatores na fabricação de bens de consumo e intermediários, acarretando maior sofisticação dos bens finais. Devido a isso, a modernização dos produtos eleva o padrão de vida da sociedade.

Com isso, elaboraram um modelo de inovação horizontal, no qual a modernização dos produtos é contínua, com níveis diferenciados de qualidade. Os empreendedores individuais escolherão os produtos que serão destinados ao melhoramento. Estas mudanças acontecem

simultaneamente em qualquer intervalo de tempo, mas nem sempre os esforços de pesquisa são bem-sucedidos. O modelo gera uma distribuição de equilíbrio de qualidades de produtos, que evolui ao longo do tempo. Cada produto é único e segue uma progressão estocástica nos níveis de qualidade.

A abordagem feita pelos autores está relacionada com o processo de geração de uma gama cada vez maior de produtos horizontalmente diferenciados. A diferenciação horizontal refere-se a um conjunto fixo de produtos distintos em termos de qualidade, que entram na cesta de consumo de cada indivíduo. Há, ainda, a diferenciação vertical que trata da disponibilidade dos produtos em um número ilimitado de qualidades distintas. Essa dinâmica de diferenciação inerente à qualidade de cada produto irá potencializar o crescimento.

Para a estruturação do modelo, os autores consideraram uma economia com um fluxo contínuo de produtos, os quais podem ser ofertados em diversa qualidade. Cada avanço na qualidade requer maior investimento em P&D.

A função de utilidade dos consumidores é intertemporal e homogênea. Os consumidores buscam maximizar sua utilidade sujeita a uma restrição orçamentária intertemporal. A maximização da utilidade dos consumidores acontece em duas fases: pela atribuição de um fluxo de despesa considerando os níveis de preços e pela seleção de uma única qualidade para cada produto.

No que tange à produção, os autores consideraram apenas um fator de produção como principal, o trabalho. Para a produção de uma unidade de produto, independentemente da qualidade, é necessária uma unidade de trabalho.

As empresas que atuam no mercado produzindo um bem de mesma qualidade irão obter lucro zero. Em contrapartida, um produtor poderá desfrutar de uma vantagem de qualidade sobre os rivais de seu mercado. As hipóteses sobre a tecnologia de desenvolvimento de produtos e a natureza dos direitos de propriedade intelectual garantem que cada indústria terá um líder de qualidade única.

Para produzir uma mercadoria, é necessário um croqui, cuja elaboração tem um alto custo. Grossman e Helpman (1991) assumiram no modelo que as patentes são uma forma de proteger uma inovação e que a imitação tem um alto custo.

As empresas são livres para inovar seus produtos estando apenas atentas aos novos lançamentos. Podem empenhar-se na investigação mesmo que as leis de patentes ou a falta de conhecimento completo acerca do melhor método de produção sejam um empecilho para a fabricação dos produtos de última geração, disponíveis no mercado. A recompensa pelo sucesso de uma pesquisa é um fluxo de lucros que durará até o próximo sucesso alcançado no mesmo mercado.

Os autores definiram a taxa de crescimento como a taxa de aumento do consumo ajustado pela qualidade dos produtos. No equilíbrio, a mesma taxa de P&D é aplicada para todos os produtos. Contudo, esforços de pesquisa se expandem em decorrência de investimentos e incentivos de mercado. Assim, o aumento das investigações será consequência do aumento da rentabilidade, bem como do crescimento dos retornos de escala da economia.

No modelo apresentado por Aghion e Howitt (1992), o crescimento é gerado por uma sequência aleatória de inovações e melhoria de qualidade, que resultam das atividades de P&D. Assim, este é um modelo vertical de inovações cuja propriedade é tornar a tecnologia anterior

ultrapassada, diferentemente do modelo de Grossman e Helpman (1991), cuja diferenciação é horizontal.

Da mesma forma que no modelo de Romer (1986), buscou-se endogeneizar o progresso tecnológico. Com isso, o modelo de crescimento de Aghion e Howitt (1992) é caracterizado como endógeno no qual as inovações verticais, geradas por um setor de pesquisa competitiva, constituem a fonte básica de crescimento.

O equilíbrio é determinado por uma expressão de diferenças. De acordo com essa expressão, a quantidade de pesquisa em qualquer período depende da quantidade esperada de pesquisa para o próximo período, de modo que a destruição criativa é a fonte para a relação intertemporal estabelecida. Ou seja, a perspectiva de pesquisas futuras ameaça dirimir toda a renda gerada pela pesquisa no tempo presente, arrefecendo-a.

O modelo básico proposto pelos autores pressupõe que existem três produtos negociáveis: trabalho, bens de consumo e bens intermediários. As preferências dos indivíduos são idênticas e intertemporais. A utilidade marginal do consumo e a taxa de juros são constantes.

O trabalho é caracterizado como não qualificado, e pode ser usado para a fabricação de bens de consumo: qualificado, quando utilizado no setor de pesquisa ou no setor de fabricação dos bens intermediários; e especializado, quando usado no setor de investigação. Cada indivíduo pode ofertar uma unidade de mão de obra.

O produto total do setor de bens de consumo é determinado pela quantidade de insumos intermediários utilizados e pela sua produtividade. O bem intermediário, por sua vez, é produzido utilizando somente mão de obra qualificada e a tecnologia disponível.

Os pesquisadores produzem uma sequência aleatória de inovações que podem estar disponíveis a qualquer instante. Esse fluxo de inovação depende somente da pesquisa atual e independe de pesquisas feitas no passado, sendo a mão de obra qualificada fator preponderante para o surgimento das inovações.

Quando a economia não aloca mão de obra qualificada para pesquisa, ela deixa de experimentar o crescimento, uma vez que não existirão inovações. Cada inovação consiste da invenção de um novo bem intermediário, que torna mais eficiente a produção do bem de consumo.

Um inovador bem-sucedido obtém uma patente que pode ser usada para monopolizar o setor intermediário. A patente é assumida para durar para sempre. No entanto, o monopólio dura apenas até a próxima inovação. Todos os mercados são perfeitamente competitivos, com exceção do mercado de bens intermediários.

O objetivo do monopolista de bens intermediário é maximizar o valor presente esperado dos lucros durante no intervalo de tempo atual. Quando o intervalo termina, os lucros também terminam. A única incerteza, portanto, diz respeito à dimensão do intervalo de tempo entre uma inovação e outra. Dentro de cada intervalo de tempo, o aumento gradual da produtividade seria induzido pela contratação de maior quantidade de trabalhadores qualificados para o setor de pesquisa, até surgir a próxima inovação.

Para saltar para a próxima inovação e seguir um caminho gradual, o fluxo do produto intermediário produzido pelo monopolista durante o intervalo de tempo deve ser igual à contratação

de mão de obra qualificada na fabricação. A curva de demanda inversa enfrentada por um monopolista é dada pelo preço em relação à quantidade dos bens de consumo. A maximização dos retornos do monopolista depende do peso dos salários dos pesquisadores, sendo sua receita marginal negativamente inclinada.

Independentemente das inovações feitas por outras empresas, cada empresa empregará seus insumos em pesquisa com o objetivo de maximizar o fluxo de lucro esperado da pesquisa. Caso o retorno da pesquisa feita pela própria firma seja constante, a pesquisa será feita por outra empresa designada pelo monopolista. A razão pela qual o monopolista resolve mudar as pesquisas para outra empresa é o fato de os custos com a pesquisa serem menores quando ela for "terceirizada". E independentemente de a empresa contratada para a realização da pesquisa ter lucros, a empresa contratante terá acesso à patente gerada no processo contratado.

Há nesse processo a importante influência do *spillover* intertemporal. Uma inovação sempre aumentará a produtividade do fator. O produtor de uma inovação recebe alguns retornos gerados pelo ganho de produtividade durante um intervalo de tempo. Esses retornos são captados por outros inovadores, que constroem seus produtos sobre a base da presente inovação, mas sem compensar o presente inovador. Assim, cada inovação é um ato de criação destinado à captura de rendas monopolistas, mas que destrói as rendas de monopólio que motivaram a criação anterior, sendo assim incorporada ao modelo a noção de "destruição criativa" de Schumpeter.

2.6 Xepapadeas: o planejador social e o meio ambiente

Da mesma forma que seus precursores, buscando avançar nas análises do crescimento econômico, Xepapadeas (2005) retoma o modelo de Ramsey, que integrou o planejador social com a finalidade de maximizar o bem-estar econômico pelo controle do consumo e da poupança, e introduz a dimensão ambiental admitindo que as utilidades das famílias representam as preferências entre o consumo por pessoa e o estoque total de poluição.

Nesse modelo, as decisões de consumo-investimento são derivadas no contexto descentralizado de maximização intertemporal, em que as famílias maximizam a utilidade e as empresas maximizam seus lucros em um mercado perfeitamente competitivo. Nessa formulação, considera-se que tanto o consumo quanto a emissão de GEE determinam a satisfação dos indivíduos. Assume-se que a função de utilidade seja crescente e côncava no consumo. O consumo ótimo é, assim, determinado pela relação entre consumir e poluir, ponderada por uma taxa de desconto intertemporal.

A maximização do lucro, por sua vez, implica diferença entre a função de produção neoclássica padrão, o consumo e a taxa de depreciação do capital. As taxas de crescimento desta economia obedecem ao sistema dinâmico, em que tudo é medido em unidades físicas.

No estado estacionário, quando se atinge o ótimo tanto para o consumo como para o investimento, em uma economia com as mesmas características que o modelo de Ramsey-Cass-Koopmans padrão, o estoque de poluição é determinado unicamente pelo equilíbrio do sistema econômico.

O estado estacionário é, no entanto, afetado se for considerado o problema do chamado planejador social. Neste caso, a maximização da utilidade pode ser considerada um indicador de bem-estar social. O planejador social procura escolher uma forma de consumo no tempo para maximizar a utilidade, sujeita apenas a restrições tecnológicas. Sabe-se que, na ausência de efeitos externos, há uma equivalência entre o resultado do problema do planejador social e o resultado do equilíbrio competitivo (BECKER; BOYD, 1997). Este princípio de equivalência expressa a dualidade entre mercados perfeitos e planejamento ideal em problemas de alocação de recursos. Na presença de externalidade ambiental, esta equivalência deixa de existir.

2.7 Edenhofer *et al.*; Leimbach e Baumstark: *spillovers* tecnológicos, questões ambientais, comércio bilateral

Edenhofer *et al.* (2005), por sua vez, elaboraram um modelo que integra progresso tecnológico e questões ambientais relacionadas às mudanças climáticas, o Modelo de Investimento e Desenvolvimento Tecnológico-MIND, que foi estruturado com o objetivo de estudar os custos de proteção ao clima em termos de perda de bem-estar e como a mudança tecnológica endógena pode influenciar na redução desses custos e alcançar os objetivos de mitigação sem que haja impactos negativos no bem-estar.

O modelo MIND incorpora mudança tecnológica endógena em relação a três aspectos: os setores de P & D em separado para eficiência no trabalho e na energia; através da diferenciação do estoque de capital físico no setor da energia, que permite estudar a dinâmica interna do setor; e segundo uma comparação das opções de eficiência energética, fontes de energia renováveis, e Captura e Sequestro de Carbono (CCS), sendo esse um aspecto que não havia sido tratado por outros modelos de avaliação integrada.

O objetivo do modelo é maximizar uma função intertemporal de bem-estar, cuja utilidade é determinada pelo consumo per capita sob desconto de uma taxa de preferência pura. Utiliza como variáveis de controle investimentos feitos em capital físico, no setor de energia renovável, na extração de recursos fósseis, no setor de energia fóssil e em P&D para melhorar a produtividade do trabalho e da energia.

Edenhofer *et al.* (2005) utilizam, na construção do modelo, uma função de produção macroeconômica do tipo CES com elasticidade de substituição constante, composta pelos fatores trabalho, capital e energia, sob a hipótese de que todos os fatores sejam essenciais na produção, sendo assim, esses fatores não podem ser totalmente substituídos.

O sistema energético, no modelo MIND, é composto por três fontes de energia: fóssil (carvão, petróleo e gás), renováveis (eólica, biomassa, solar e geotérmica) e de energia não fóssil tradicional (energia nuclear, biomassa tradicional e grandes hidrelétricas). O *learning by doing* é inserido no sistema energético no sentido de aumentar a produtividade do capital no setor. Ademais, calcula os retornos sociais do setor de P&D, tratando os *spillovers* intertemporais como um fenômeno natural que ocorre via investimento em P&D.

Para verificar as emissões, o autor inclui as emissões antropogênicas de carbono, que estão diretamente ligadas à combustão de combustíveis no setor de energia fóssil, sendo esses gases responsáveis por uma mudança na temperatura média. Além disso, insere no modelo gases de efeito estufa que não sejam CO₂ emitidos pela radioatividade, porém esses são dados exógenos.

O MIND é, portanto, um modelo projetado para avaliar o crescimento econômico mensurado em termos de perda do bem-estar, considerando a integração da mudança tecnológica endógena e as questões climáticas nas análises. Contudo, o modelo trata o mundo como uma unidade, sem a diferenciação regional, uma limitação do modelo que impede a realização de análises inter-regionais dos efeitos do comércio.

Leimbach e Baumstark (2010) apresentaram o modelo MIND-RS, uma evolução do modelo uniregional de Avaliação Integrada de Investimento e Desenvolvimento-MIND, desenvolvido por Edenhofer *et al.* (2005). Este modelo busca integrar comércio bilateral dinâmico, em cenários de políticas climáticas, considerando os *spillovers* tecnológicos *embodied* em um mundo globalizado, superando assim a limitação apresentada pelo MIND.

O modelo MIND-RS adota do MIND a estrutura do sistema de energia e investimento intertemporal dinâmico, incluindo os investimentos em P&D, investimento intertemporal dinâmico, incluindo os investimentos em P&D e o *learnbydoing*, que representam uma importante função de mudança tecnológica endógena. Ao contrário do MIND, o MIND-RS separa o setor industrial agregado em setor de bens de consumo / serviço do setor de bens de investimento.

No modelo MIND-RS um planejador social tem como objetivo maximizar o bem-estar econômico da sociedade no longo prazo, através das variáveis de controle, considerando tanto as mudanças no clima quanto as mudanças tecnológicas endógenas.

Dessa forma, em um cenário de mudanças climáticas em que as regiões estão comercialmente interligadas, os países desenvolvidos, que apresentam eficiência energética e em trabalho, exportam bens de capital nos quais está incorporada tecnologia. Esses bens de capital serão importados pelos países em desenvolvimento, sendo uma parte alocada nos setores de bens de consumo e serviços e setor de bens de investimentos, acarretando aumento no estoque de capital nesses setores, e outra parte destinada ao setor de pesquisa (P&D), representando um importante recurso da mudança tecnológica endógena. Em conjunto com a importação dos bens de capital, há a importação indireta da tecnologia desenvolvida para produção desses bens. Esse transbordamento tecnológico aumenta a produtividade dos fatores, que influenciará tanto no produto quanto no bem-estar econômico.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos de crescimento econômico apresentados nesse estudo buscaram demonstrar através das variáveis: poupança, consumo, investimento, capital, trabalho e tecnologia, bem como variáveis capazes de demonstrar os impactos do crescimento ao meio ambiente.

O modelo de crescimento de Harrod – Domar considera que o crescimento é dado por fatores externos tomando como principal indutor as expectativas dos empresários. Diferentemente, Solow–

Suan (1956) vai considerar o crescimento exógeno considerando as externalidades, ou seja, o progresso tecnológico exógeno é um fator propulsor do crescimento.

Por sua vez, o modelo de Ramsey Cass Koopmans (1965) diferencia-se do modelo de Solow–Suan (1956) por apresentar a poupança como um fator endógeno ao sistema, determinada pela decisão dos agentes quanto à maximização da sua utilidade no presente ou no futuro.

Hotelling (1931) pressupõe o uso dos recursos naturais seria mais eficiente se fossem cobradas taxas pela sua exploração, com isso o desgaste seria minimizado. Stiglitz (1974) e Solow (1986) afirmam que se o progresso tecnológico for maior que o desgaste ambiental não haverá danos ao meio ambiente.

Em contrapartida, o modelo de crescimento de Uzawa (1965) - Lucas (1988) considera o aperfeiçoamento do capital como o indutor do crescimento, e expõe a possibilidade de haver efeitos transbordamentos (*spillovers*) de capital humano entre os diferentes países, e assim concebe o crescimento como endógeno a partir de uma abordagem multiregional, sem considerar variáveis ambientais.

Grossman e Helpman (1991) e Aghion e Howitt (1992), têm a mesma concepção de que por forças internas ao sistema, no qual as externalidades têm um papel fundamental no crescimento é, também, multiregional. Contudo, diferencia-se por considerar fatores como inovação tecnológica endógena, capital humano e os arranjos institucionais preponderantes nas análises do processo de crescimento.

Por fim, modelo de Ramsey, desenvolvido por Xepapadeas (2005), buscou atualizar as análises de bem-estar, inserindo a questão ambiental na pressuposição de que a satisfação das famílias é determinada pelo consumo e pelo estoque de poluição. Ademais, os modelos de Edenhofer, Bauer e Kriegler (2005) e Leimbach e Baumstark (2010) também configuram iniciativas recentes de integrar questões relacionadas às mudanças climáticas e aos *spillovers* tecnológicos nas análises de bem-estar.

Sendo assim, cada estudo traz um elemento inovador denotando o avanço das abordagens, contribuindo, assim, para análises sistemáticas e tomadas de decisões capazes de redirecionar a trajetória econômica minimizando, ou até mesmo impedindo a ocorrência de um colapso tanto das economias como da provisão de recursos pelo meio ambiente.

REFERÊNCIAS

AGHION, P; HOWITT, P. A Model of Growth Through Creative Destruction. **Source Econometrica**, v. 60, n. 2, p. 323-351. 1992.

ARROW, K. "The Economic Implications of Learning by Doing". **Review of Economic Studies**. v.29, p. 73-155, 1962

BARRO, R. SALA-I-MARTIN, X. **Economic growth**. Cambridge: The Mint Press, 2004. 540 p

BECKER, R. A; BOYD, J. H. **Capital theory, equilibrium analysis, and recursive utility** . Blackwell. 1997

CASS, D. Optimum Growth in an Aggregate Model of Capital Accumulation. *Review of Economic Studies*. v 32, p 233-240, 1965.

DOMAR, Eusey O. Capital Expansion, Rate of Growth and Employment. **Econometrics**. nº. 14, abril. 1946

EDENHOFER, O.; BAUER, N.; KRIEGLER, E. The impact of technological change on climate protection and welfare: Insights from the model MIND. **Ecological Economics**, v. 54, n. 2, p. 277-292, 2005.

GROSSMAN, G.; HELPMAN, E. Innovation and Growth in the Global Economy. Cambridge, MA: MIT Press, 1991.

HARROD, R. An essay in dynamic theory. *Economic Journal*, v.49, n.193. p.14-33. 1939.

KOOPMANS, T. C. On The Concept of Optimal Economic Growth. In *The Econometric Approach to Development Planning*, Amsterdam: North-Holland, v 3, p. 225-195, 1965.

LEIMBACH, M.; BAUMSTARK, L. The impact of capital trade and technological spillovers on climate policies. **Ecol. Econ.** v.69, p. 2341–2355, 2010.

LUCAS, R. E. Jr. On the mechanics of economic development. **Journal of monetary Economics**. v. 22. p. 3-42. 1988

RAMSEY, F. A Mathematical Theory of Saving. **Economic Journal**, v. 38, p. 543-559, 1928.

ROMER, P. M. Endogenous technological change. **The Journal of Political Economy**, v. 98 n. 5, p. 71 – 102, 1990.

SOLOW, R. M. A contribution to the theory of economic growth. **The quarterly journal of economics**, v. 70, n. 1, p. 65-94, 1956.

SOLOW, R. M. On the intergenerational allocation of natural resources. **The Scandinavian Journal of Economics**, p. 141-149, 1986.

STIGLITZ, J. Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths. **The Review of Economic Studies**, v. 41, p. 123-137, 1974.

UZAWA, H. Optimum technical change in an aggregative model of economic growth. **International Economic Review**, v. 6, p. 18–31, 1965.

XEPAPADEAS, A. **Economic Growth and the Environment**. In *Handbook of Environmental Economics*. Elsevier. Edition 1, vol. 3, n.3., 2005.