

A INTEGRAÇÃO DOS FLUXOS FÍSICOS DE MATÉRIA E ENERGIA NA ANÁLISE DA REPRODUÇÃO ECONÔMICA DA SOCIEDADE

Benedito Silva Neto

Introdução

A adequação das categorias econômicas para a análise dos problemas ambientais que ameaçam a sustentabilidade das sociedades contemporâneas tem sido objeto de um intenso debate. As relações entre os aspectos físicos e econômicos das atividades humanas são elementos centrais nesse debate. Neste texto é realizada uma discussão conceitual e metodológica sobre a integração dos fluxos físicos de matéria e energia na análise da reprodução econômica da sociedade. Inicialmente é discutida uma concepção do sistema econômico que permita situá-lo como um subsistema componente da biosfera, ao lado dos sistemas naturais dos quais se originam os fluxos de matéria e energia que constituem a base material da reprodução das sociedades humanas. Em seguida, propomos uma representação desses fluxos no sistema econômico por meio de uma técnica de modelagem que permite formalizar a dinâmica da economia como um sistema aberto.

As transformações de matéria e de energia na economia

Neste texto consideramos o trabalho humano como o processo fundamental da atividade econômica. Neste sentido, é importante salientar que o trabalho humano implica sempre em transformações energéticas irreversíveis. Georgescu-Roegen (1971) foi o primeiro autor de destaque a, de certa forma, analisar este fenômeno, salientando a dependência da economia em relação aos sistemas naturais. No entanto, de forma mais clara do que na obra de Georgescu Roegen, os trabalhos desenvolvidos por Ilya Prigogine e seus colaboradores sobre as estruturas dissipativas (como em Prigogine; Stengers, 1986) deixam pouca margem sobre a natureza irreversível e, portanto, histórica do desenvolvimento de todo sistema auto-organizado, inclusive as sociedades humanas. No entanto, para que estas relações possam ser suficientemente esclarecidas, é necessária uma exposição, mesmo que breve e simplificada, dos fundamentos termodinâmicos que sustentam esta interpretação, a qual é realizada a seguir.

Podemos definir as relações energéticas que ocorrem em um sistema termodinâmico por meio da expressão,

$$\Delta E = \Delta G + \Delta TS$$

Onde

Δ = símbolo que indica variação da quantidade

E = energia total do sistema (joules)

G = energia livre (joules)

T = temperatura (graus Kelvin)

S = entropia (joules/graus Kelvin)

A variação da energia total ΔE representada por ΔTS é a que não pode gerar trabalho, ou seja, provocar variações de pressão ou volume do sistema. A entropia S está relacionada aos estados possíveis de um sistema, os quais aumentam com o aumento da entropia. Isto pode ser expresso quantitativamente pela equação de Boltzmann,

$$S = \Omega \log W$$

onde

Ω = constante de Boltzman (joules/graus Kelvin)

W = número de arranjos possíveis do sistema

A entropia não pode ser negativa, isto é, um sistema termodinâmico espontaneamente tende a aumentar o seu grau de desordem. Para que um sistema termodinâmico possa se organizar, portanto, há necessidade de um aporte de energia com entropia mais baixa vindo do seu exterior.

A partir da entropia pode-se classificar os sistemas termodinâmicos em dissipativos e conservativos. Os sistemas dissipativos, ao contrário dos sistemas conservativos, são aqueles em que a energia livre, que pode gerar trabalho, não é conservada. Nesses sistemas as transformações sofridas pela energia geram calor, o qual é dissipado para o meio externo. Assim, em um sistema dissipativo há geração de entropia, que, como mencionado, está relacionada à quantidade de energia a partir da qual não se pode obter trabalho. Como a geração de entropia é um processo irreversível, um sistema dissipativo só pode aumentar sua quantidade de energia livre obtendo-a do exterior. Na ausência de uma fonte de energia com baixa entropia (alta energia livre), os sistemas dissipativos tendem ao estado de equilíbrio termodinâmico, isto é, a um equilíbrio simultaneamente químico, térmico e mecânico. Neste estado a entropia do sistema é máxima e ele é macroscopicamente estável, ou seja, na ausência de perturbações externas não apresenta variações no seu estado global (Güemez, J.; Fiolhais, C. e Fiolhais, M., 1998).

A camada que envolve o planeta Terra onde a vida se desenvolve, a biosfera, pode ser caracterizada termodinamicamente como um sistema dissipativo que se mantém longe do equilíbrio (Gribbin, J., 2004, p. 219). Por exemplo, a atmosfera terrestre possui uma composição estatisticamente improvável, que só pode ser explicada pela presença de vida. O gás oxigênio (O_2), que constitui 21% da atmosfera da Terra, é altamente reativo, e o gás carbônico (CO_2), que é pouco ativo quimicamente, mantém-se em níveis relativamente baixos (cerca de 0,03% da atmosfera). Se a atmosfera terrestre se encontrasse no estado de equilíbrio químico, nas condições de pressão e temperatura vigentes, a concentração do gás oxigênio seria muito mais baixa e a de gás carbônico muito mais alta. As concentrações observadas desses dois gases na atmosfera só podem ser explicadas

pela manutenção de uma relação quantitativa particular entre a fotossíntese que, a partir da energia solar, é realizada por vegetais e algas, liberando gás oxigênio, o qual é consumido na respiração (e outros processos oxidativos, como a combustão) que libera gás carbônico. Portanto, é a própria vida que é responsável por manter as condições ambientais que permitem a sua continuidade, o que caracteriza a biosfera como um sistema auto-organizado (Gribbin, J., 2004).

A biosfera é um sistema dissipativo altamente heterogêneo, apresentando uma grande diversidade de subsistemas os quais são, também, sistemas dissipativos. Assim, os sistemas físico-químicos, ecológicos e sociais presentes na Terra são sistemas dissipativos. E grande parte dos sistemas dissipativos da biosfera, em especial os ecológicos e sociais, são sistemas que permanecem fora do equilíbrio, por meio de um constante aporte de energia livre, a qual é utilizada para o seu estabelecimento e manutenção, isto é, para a sua auto-organização.

Os processos de organização apresentados pelos sistemas dissipativos dependem de fontes externas de energia com entropia mais baixa do que a do próprio sistema. Isto permite que os sistemas dissipativos possam transferir a entropia gerada durante sua organização para o seu exterior, o qual, salientamos, deve ter um grau de entropia inferior ao do sistema. Assim, apesar de um sistema dissipativo poder aumentar o seu grau de organização, há um aumento no total de entropia gerada. Prigogine (1997, p.13) salienta que sem a geração de entropia a auto-organização apresentada por certos sistemas dissipativos não seria possível. Segundo Prigogine e Stengers (1986, p. 52), é por meio da geração de entropia que ocorrem os processos irreversíveis que são responsáveis pelo fato do passado e o futuro serem distintos e irreduzíveis um ao outro, isto é, pela existência de um tempo histórico e evolutivo, pois irreversível. Por este motivo, a entropia desempenha um papel central nos processos evolutivos, o que implica ir além da interpretação corrente que a identifica simplesmente como uma medida do grau de desordem de um sistema. Segundo Prigogine e Stengers (1986) a expressão "estrutura dissipativa" foi escolhida propositalmente para expressar o fato de que a geração de entropia - geralmente associada às noções de perda de rendimento e de evolução em direção à desordem - torna-se fonte de ordem quando o sistema se encontra longe do equilíbrio, provocando sua auto-organização, ou "estruturação" (Prigogine; Stengers, 1986, p. 215-216).

Uma consequência importante dos conceitos termodinâmicos brevemente discutidos nos parágrafos anteriores é que a partir dos mesmos pode-se concluir que a geração de todas as riquezas físicas dependem de fluxos de energia proveniente de fontes com baixa entropia. Os processos de auto-organização responsáveis pela constituição de materiais com energia de baixa entropia são, portanto, as fontes primárias de riqueza da sociedade. Neste sentido, em termos termodinâmicos não há riqueza natural gratuita, isto é, toda geração de riqueza implica em uma transformação irreversível de energia, com uma diminuição da sua capacidade de gerar mudanças no sistema.

Os seres biológicos apresentam processos de auto-organização que, embora decorrentes dos processos já presentes nos seres inorgânicos, apresentam maior grau de complexidade. Esses processos de auto-organização geram organismos capazes de reprodução que se distinguem do seu ambiente. Além disto, as mudanças qualitativas que caracterizam os processos evolutivos são muito mais rápidas nos seres biológicos do que nos seres inorgânicos. O caráter histórico e evolutivo dos seres biológicos é, assim, não apenas ainda mais marcante, mas, sobretudo, qualitativamente diferente do apresentado pelos seres inorgânicos. Ao longo do seu processo de evolução, os seres biológicos se adaptam ao seu ambiente, de forma a se preservar como espécie.

É na forma como ocorre essa adaptação que se encontra a origem das diferenças entre o ser (simplesmente) biológico e o ser social. Neste último a adaptação ocorre por meio de uma atividade consciente, o trabalho, a qual integra dois aspectos distintos. O primeiro é uma posição teleológica, ou seja, a concepção de um objeto a ser produzido. O segundo é a manipulação dos processos puramente causais que possibilitam a fabricação do objeto concebido. É, portanto, no processo material e histórico de trabalho que se consuma a distinção entre sujeito e objeto pelo ser humano (Lukács, 2009, p. 75).

De acordo com esta concepção, a possibilidade de escolha, ou seja, certa liberdade, é inerente ao processo de trabalho e, portanto, a toda atividade econômica, da qual ele é o fundamento. Posições teleológicas e formas de manipulação dos processos causais podem ser modificadas pelo ser social sendo, no entanto, sujeitas a erros na sua transformação em produtos úteis, do que depende a sua validação como um efetivo processo de trabalho. Em outras palavras, se uma atividade pretensamente produtiva falha em transformar-se no produto desejado, ela não é um processo de trabalho. Porém, mesmo assim, mesmo podendo efetivar-se somente *ex-post*, sempre há uma liberdade de escolha no processo de trabalho, o que implica que o mesmo não é determinado estritamente pelas condições ambientais, sendo, portanto, irreduzível a qualquer pretensão mecanismo econômico automático.

A sustentabilidade ecológica e a reprodução social são, portanto, processos que, embora relacionados, são de natureza distinta. Como discutido no início desta seção, a dinâmica dos sistemas naturais é determinada por processos de natureza essencialmente termodinâmica. São esses processos que determinam as condições para a sustentabilidade das sociedades. No entanto, a reprodução das sociedades é regida por processos sociais, fundamentados no trabalho, que, embora dependentes dos processos naturais, não são estritamente determinados por eles. Há, portanto, na reprodução das sociedades humanas sempre a possibilidade de ocorrer contradições entre os processos de reprodução social propriamente ditos e os processos naturais responsáveis pela sua sustentabilidade.

Essas contradições sempre existiram ao longo da história da Humanidade. As sociedades humanas sempre provocaram certo grau de perturbação na dinâmica dos sistemas naturais, as quais colocaram restrições à sua sustentabilidade. Mas tais restrições se manifestavam essencialmente em

nível local e, ao longo da sua história, os seres humanos desenvolveram várias práticas para assegurar a manutenção das condições ambientais necessárias à sua reprodução social. Neste sentido, é interessante observar que as práticas que procuraram conciliar reprodução social e sustentabilidade ecológica desenvolvidas ao longo da história da Humanidade podem ser claramente identificadas na agricultura. É neste sentido que Mazoyer e Roudart (1997) salientam a necessidade de analisar a dinâmica da agricultura em termos de “sistemas agrários”, isto é, formas de agricultura que integram, de maneira mais ou menos coerente, práticas destinadas à exploração dos ecossistemas cultivados e práticas que tem como objetivo assegurar a reprodução do seu potencial produtivo. Para Mazoyer e Roudart (1997), assim, na agricultura não se trata apenas de preservar passivamente os sistemas naturais para manter as condições para a sua sustentabilidade, mas de agir ativamente neste sentido por meio da integração no processo de trabalho de práticas com este objetivo específico. É neste sentido que Mazoyer e Roudart (1997) identificam um complexo processo de evolução histórica e diferenciação geográfica responsável por uma grande diversidade de sistemas agrários que sempre conjugam práticas de exploração e de reprodução da capacidade produtiva dos ecossistemas. Os sistemas agrários que melhor conjugaram essas práticas foram os que apresentaram maior longevidade, por vezes de milhares de anos.

Tal não parece ser o caso dos sistemas agrários hegemônicos atualmente, que se desenvolveram a partir da dinâmica do capitalismo. As relações de produção capitalistas, ao favorecer o desenvolvimento da indústria e do comércio em longa distância, criam condições únicas para que as restrições locais colocadas pelos sistemas naturais sejam contornadas. A reprodução da capacidade produtiva dos ecossistemas cultivados passa a ser largamente assegurada por insumos químicos obtidos, em geral obtidos a partir da mineração, que agem em oposição às relações ecológicas antes orientadas para este processo, do que resulta uma drástica simplificação dos ecossistemas cultivados. Tal simplificação é intensificada pela enorme capacidade de aplicação de energia na agricultura permitida pela sua mecanização motorizada.

No caso da indústria, o fato dela operar em condições ambientais mais controladas faz com que a sua dependência em relação aos processos naturais seja menos evidente, o que favorece a noção de que os processos produtivos podem ocorrer de forma independente da dinâmica dos sistemas naturais. A mobilidade das mercadorias e dos recursos produtivos, assegurada pelo mercado, permite o surgimento de uma economia monetária em que todas as contradições locais entre exploração da natureza e a reprodução das suas capacidades produtivas parecem poder ser resolvidas pela compra de recursos externos, criando a ilusão da possibilidade de um crescimento infinito da produção. Neste contexto, a produção passa a ser presidida pela acumulação de valores monetários, os quais, considerados como riquezas em si (e não apenas meios socialmente definidos de ter acesso a elas) exacerbam as contradições entre sustentabilidade e reprodução social. O fato dos recursos escassos

poderem ser comprados, o que permite a sua transferência das regiões onde os mesmos são abundantes, contornando assim as restrições locais, parece ter influenciado os economistas a considerar que os recursos naturais só colocam limitações aos processos produtivos quando estes dependem diretamente de tais recursos, como no caso da agricultura e da mineração. No entanto, é evidente que todo processo econômico implica em fluxos físicos de matéria e de energia, não podendo ser analisados unicamente por meio de valores monetários. Na próxima seção serão discutidas as relações entre esses fluxos.

Os fluxos de matéria e energia na reprodução econômica da sociedade

As considerações realizadas anteriormente colocam a necessidade de elaborar modelos em termos físicos, explicitando suas relações com o tempo de trabalho e valores monetários, para que se possa compreender adequadamente o processo de reprodução do sistema econômico. A elaboração de esquemas desse tipo, porém, não é algo trivial. Ela exige a consideração metódica do papel desempenhado pela formação de rendas no conjunto da economia, na medida em que é por meio das rendas que se pode atribuir preços às riquezas naturais. E para que isto possa ser feito adequadamente é preciso reconhecer explicitamente a diversidade dos processos de trabalho (ou seja, técnicas) presentes na sociedade, a qual representa diferentes possibilidades de relação dos seres humanos com a natureza.

Diante dessas exigências, a programação linear parece ser um método de cálculo adequado para elaborar modelos que possam gerar esquemas de reprodução econômica nos quais o papel das riquezas naturais possa ser explicitamente analisado. Antes, porém, de realizar uma análise detalhada da estrutura formal de tais modelos, as suas características básicas podem ser mais facilmente apreendidas por meio de um exemplo numérico, tendo como ponto de partida esquemas de reprodução econômica. Na tabela 1 é apresentado um esquema de reprodução econômica em termos físicos, considerando a economia como um sistema aberto. Para simplificar a discussão, foi considerado apenas um recurso natural escasso.

Observa-se na tabela 1 que o recurso natural não depende de meios de produção para ser produzido, pois é fornecido pela natureza. O meio de produção 1 corresponde à extração do recurso natural, empregando para isto os meios de produção 2 e 3. A geração do meio de produção 2 depende do meio de produção 1, sendo que a geração do meio de produção 3 depende do meio de produção 2. Os produtos para consumo final (abreviados na tabela como “produtos finais”), como seu nome indica, não entram na produção de qualquer outro produto, sendo que a sua geração depende de todos os meios de produção. Ressaltamos que o sistema se encontra em reprodução simples, como indica a ausência de excedentes de meio de produção, os quais, no entanto, poderiam ser introduzidos no problema sem afetar as suas características.

As relações mostradas na tabela 1 são em boa parte qualitativas. Como pode ser observado nesta tabela, a soma dos meios de produção apresentados nas linhas da tabela não corresponde a quantidade dos produtos por eles gerados, sendo que estas, por serem de qualidades diferentes, não podem ser somadas. O tempo de trabalho requerido também é específico a cada produto. A especificidade das relações quantitativas entre meios de produção e produtos finais e entre estes e o tempo de trabalho deve-se ao fato de que estas relações são determinadas por técnicas de produção específicas a cada produto.

Tabela 1: Esquema de reprodução econômica em fluxos físicos

	Recurso Natural	Meio de produção 1	Meio de produção 2	Meio de produção 3	Produto	Tempo de trabalho
Recurso natural					460	
Meio de produção 1	460		184	230	460	920
Meio de produção 2		310			387,5	2325
Meio de produção 3			148,5		855	9000
Produto final 1		100	50	500	100	1000
Produto final 2		50	5	125	50	1000
Total	460	460	387,5	855		14245
Excedente	0	0	0	0		

Fonte: elaborado pelo autor

A consideração do recurso natural como uma entrada de riquezas físicas no sistema econômico, assim como a consideração de que os produtos destinados aos consumidores correspondem a riquezas físicas que saem do sistema, e não apenas a um elo no ciclo de produção, diferenciam o esquema apresentado na tabela 1 em relação aos esquemas econômicos usualmente utilizados. Esses esquemas, ao não considerar explicitamente os recursos naturais, representam um ciclo fechado, o que dificulta a análise do papel das riquezas físicas na reprodução econômica da sociedade.

Na tabela 2 são apresentados os tempos de trabalho necessários para a geração dos produtos e meios de produção mostrados na tabela 1. Conforme se observa na tabela 2, o recurso natural não demanda trabalho para ser produzido. Salientamos que os tempos de trabalho mostrados na tabela 2 são os aplicados diretamente. Por exemplo, o tempo de trabalho indicado para os produtos de consumo final não inclui o tempo de trabalho dedicado à geração dos meios de produção.

Tabela 2: Esquema de reprodução econômica em tempo de trabalho

	Recurso Natural	Meio de produção 1	Meio de produção 2	Meio de produção 3	Produto
Recurso natural					0
Meio de produção 1	0		1104	2.421,05	920
Meio de produção 2		620			2325
Meio de produção 3			891		9000
Produto final 1		200	300	5.263,16	1000
Produto final 2		100	30	1.315,79	1000
Total	0	920	2325	9000	14245
Excedente	0	0	0	0	

Fonte: elaborado pelo autor

A reprodução do sistema em valores monetários é apresentada na tabela 3.

Tabela 3: Esquema de reprodução em valores monetários

	Recurso Natural	Meio de produção 1	Meio de produção 2	Meio de produção 3	Valor meios de produção	Valor monetário	Valor agregado
Recurso natural						230	
Meio de produção 1	230		3680	3220	7130	8050	920
Meio de produção 2		5425			5425	7750	2325
Meio de produção 3			2970		2970	11970	9000
Produto final 1		1750	1000	7000	9750	10750	1000
Produto final 2		875	100	1750	2725	3725	1000
Total	230	8050	7750	11970	28000	42245	14245
Excedente	0	0	0	0			

Fonte: elaborado pelo autor

É interessante observar que o valor monetário do recurso natural mostrado na tabela 3 é considerado antes da sua extração da natureza, na medida em que é o meio de produção 1 que é gerado pela extração do recurso natural (como na mineração). Assim, por não exigir trabalho para ser produzido, como mostrado na tabela 3, o seu valor agregado é nulo, sendo o seu valor monetário constituído apenas por transferências de valor agregado de outros produtos, ou seja, constituído de rendas. Por outro lado, é interessante salientar que o recurso natural, direta ou indiretamente, se constitui em um custo para a geração de outros produtos, o que faz com que o seu preço afete os preços dos produtos gerados pelo trabalho.

A modelagem da relação entre riquezas (quantidades físicas), valor (tempo de trabalho) e preços

A reprodução do sistema econômico em valores monetários, mostrada na tabela 3, foi obtida pela multiplicação das quantidades físicas mostradas na tabela 1 pelos seus preços, os quais foram calculados por meio de um modelo de programação linear. Este modelo foi formulado a partir dos coeficientes por unidade de produto empregado para calcular os valores da tabela 1. Estes valores são mostrados na tabela 4.

Tabela 4: Coeficientes do modelo

	Produto final 1	Produto final 2	Meio de produção 1		Meio de produção 2		Meio de produção 3	
			Técnica 1	Técnica 2	Técnica 1	Técnica 2	Técnica 1	Técnica 2
			1	2	1	2	1	2
Tempo de trabalho	10	20	2	4	6	10	10	12
Recurso Natural			1	0,5				
Meio de produção 1	1	1			0,8	0,6		
Meio de produção 2	0,5	0,1	0,4	0,2			0,2	0,1
Meio de produção 3	5	2,5	0,5	0,7				

Fonte: elaborado pelo autor

A partir dos coeficientes da tabela 4, da demanda de produtos finais e do fluxo corrente de exploração do recurso natural foi elaborado um modelo de programação linear. O problema primal é,

$$\text{Minimizar } 10 \text{ } pf1 + 20 \text{ } pf2 + 2 \text{ } mp11 + 4 \text{ } mp12 + 6 \text{ } mp21 + 10 \text{ } mp22 + 10 \text{ } mp31 + 12 \text{ } mp32 \quad (1)$$

Sujeito às restrições

$$\text{demanda do produto 1) } pf1 \geq 100 \quad (2)$$

$$\text{demanda do produto 2) } pf2 \geq 50 \quad (3)$$

$$\text{demanda do meio de produção 1) } -pf1 - pf2 + mp11 + mp12 - 0.8 \text{ } mp21 - 0.6 \text{ } mp22 \geq 0 \quad (4)$$

$$\text{demanda do meio de produção 2) } -0.5 \text{ } pf1 - 0.1 \text{ } pf2 - 0.4 \text{ } mp11 - 0.2 \text{ } mp12 + mp21 + mp22 - 0.2 \text{ } mp31 - 0.1 \text{ } mp32 \geq 0 \quad (5)$$

$$\text{demanda do meio de produção 3) } -5 \text{ } pf1 - 2.5 \text{ } pf2 - 0.5 \text{ } mp11 - 0.7 \text{ } mp12 + mp31 + mp32 \geq 0 \quad (6)$$

$$\text{demanda do recurso natural) } mp11 + 0.5 \text{ } mp12 \leq 460 \quad (7)$$

onde, ($pf1$) e ($pf2$) são os produtos para consumo final e ($mp1$), ($mp2$) e ($mp3$) são os meios de produção. Os valores mostrados na função a ser minimizada (denominada “função objetivo”), são os tempos de trabalho diretamente aplicados para a geração de cada produto de consumo final e cada

meio de produção. As inequações correspondem às demandas, calculadas com base nas quantidades físicas requeridas para a geração de cada unidade de produto de consumo final e meio de produção. Vale salientar que, como o recurso natural não é gerado pelo trabalho, a quantidade que pode ser utilizada por ciclo de produção (460 unidades) corresponde a uma restrição externa ao funcionamento do sistema econômico. O problema primal, assim, fornece as quantidades a serem produzidas de acordo com as restrições impostas pelas inequações que permitem minimizar o tempo de trabalho, ou seja, o valor. A solução deste problema primal forneceu as quantidades dos produtos de consumo final e dos meios de produção que constam na tabela 1. Esta solução é mostrada na tabela 5.

Tabela 5: Solução do problema primal

	Produto final 1	Produto final 2	Meio de produção 1		Meio de produção 2		Meio de produção 3	
			Técnica 1	Técnica 2	Técnica 1	Técnica 2	Técnica 1	Técnica 2
			Trabalho	1000	1000	920	0	2325
Quantidade por unidade de trabalho	10	20	2	4	6	10	10	12
Quantidade total	100	50	460	0	387,5	0	630	225

Fonte: elaborado pelo autor

A partir do problema primal foi formulado um problema dual, cuja solução fornece os preços dos produtos que proporcionam o máximo valor monetário possível nas condições técnicas especificadas pelas restrições. Este problema dual é descrito como,

$$\text{Maximizar } 100 \text{ } ppf1 + 50 \text{ } ppf2 + 0 \text{ } pmp1 + 0 \text{ } pmp2 + 0 \text{ } pmp3 - 460 \text{ } prn \quad (8)$$

Sujeito às restrições

$$pf1) \text{ } ppf1 - pmp1 - 0.5 \text{ } pmp2 - 5 \text{ } pmp3 \leq 10 \quad (9)$$

$$pf2) \text{ } ppf2 - pmp1 - 0.1 \text{ } pmp2 - 2.5 \text{ } pmp3 \leq 20 \quad (10)$$

$$mp11) \text{ } pmp1 - 0.4 \text{ } pmp2 - 0.5 \text{ } pmp3 - prn \leq 2 \quad (11)$$

$$mp12) \text{ } pmp1 - 0.2 \text{ } pmp2 - 0.7 \text{ } pmp3 - 0.5 \text{ } prn \leq 4 \quad (12)$$

$$mp21) \text{ } -0.8 \text{ } pmp1 + pmp2 \leq 6 \quad (13)$$

$$mp22) \text{ } -0.6 \text{ } pmp1 + pmp2 \leq 10 \quad (14)$$

$$mp31) \text{ } 0.2 \text{ } pmp2 + pmp3 \leq 10 \quad (15)$$

$$mp32) \text{ } -0.1 \text{ } pmp2 + pmp3 \leq 12 \quad (16)$$

onde, ($ppf1$) e ($ppf2$) são os preços dos produtos para consumo final, ($pmp1$), ($pmp2$) e ($pmp3$) são os preços dos meios de produção gerados pelo trabalho e (prn) é a renda que é gerada quando o recurso natural é escasso.

É interessante observar que os preços e as rendas fornecidos pelo problema dual correspondem a variação marginal do valor da função objetivo do problema primal em relação à variação de uma unidade de cada um dos coeficientes do lado direito das restrições, consideradas isoladamente. Os preços, portanto, são valores marginais. A solução do problema dual é descrita na tabela 6.

Tabela 6: Solução do problema dual

	Produto 1	Produto 2	Meio de produção 1	Meio de produção 2	Meio de produção 3	Recurso Natural
Valores monetários	10750	3725	0	0	0	-230
Preços e renda	107,5	74,5	17,5	20	14	0,5

Fonte: elaborado pelo autor

O que torna ativa a restrição de recurso natural, descrita no problema primal pela expressão (7), é a sua escassez. De fato, para que todos os meios de produção e os produtos para consumo final possam ser gerados por meio das técnicas que, diretamente (no caso do meio de produção 1), ou indiretamente (no caso das demais atividades) mais exigem recurso natural (o que caracterizaria a sua abundância) seriam necessárias pelo menos 490 unidades físicas de recurso natural. Por outro lado, é interessante ressaltar que apenas a escassez do recurso natural não é suficiente para alterar os preços. Sem alternativas técnicas, um aumento da escassez tornaria impossível a manutenção do nível de produção e a única forma de manter a reprodução do sistema econômico seria pela diminuição da demanda dos produtos de consumo final. Isto mostra que não é a escassez em si que provoca o aumento dos preços, mas sim o aumento do tempo de trabalho que ela provoca, o qual se manifesta por meio dos preços dos recursos naturais, gerando rendas (Silva Neto, 2018).

A estrutura formal do modelo apresentado nos parágrafos anteriores por meio do exemplo numérico é apresentada a seguir. O problema primal é,

$$\text{Função objetivo: } \text{minimizar } \sum c_i^l q_i^l + \sum c_z^x m_z^x \quad (17)$$

Sujeita às restrições

$$\text{Demanda de produtos de consumo final} \quad (18)$$

$$\sum q_i^l \geq D_i$$

$$\text{Demanda de meios de produção} \quad (19)$$

$$\sum m_z^x - \sum a_{iz}^l q_i^l \geq M_z$$

$$\text{Demanda de recursos naturais} \quad (20)$$

$$\sum \sigma_{jz}^x m_z^x \leq R_j$$

onde temos,

c_i^l = quantidade (c) de trabalho necessária por unidade do produto (i) com a técnica (l).

q_i^l = quantidade (q) do produto (i) fabricado com a técnica (l).

c_z^x = quantidade (c) de trabalho por unidade de meio de produção (z) gerado com a técnica (x).

m_z^x = quantidade (m) do meio de produção (z) gerado com a técnica (x).

D_i = quantidade demandada (D) de produto (i).

M_z = quantidade excedente (M) do meio de produção (z) necessária para a reprodução ampliada (reprodução simples $M = 0$)

a_{iz}^l = quantidade (a) do meio de produção (z) necessária para produzir uma unidade do produto (i) com a técnica (l).

σ_{jz}^x = quantidade (σ) de recurso natural (j) necessário para a produção do meio de produção (z) com a técnica (x).

R_j = quantidade máxima (R) que pode ser utilizada do recurso natural (j).

A estrutura formal do problema dual do modelo é,

$$\text{Função objetivo: maximizar } \sum D_i p_i + \sum M_z \beta_z - \sum R_j r_j \quad (21)$$

Sujeita às restrições

Condições técnicas para a formação dos preços dos produtos finais

$$p_i - \sum a_{iz}^l \beta_z \leq c_i^l \quad (22)$$

Condições técnicas para a formação dos preços dos meios de produção e das rendas geradas pela escassez dos recursos naturais

$$\beta_z - \sum \sigma_{jz}^x r_j \leq c_z^x \quad (23)$$

onde, além das variáveis do problema primal, já descritas, temos,

p_i = preço (p) do produto (i).

β_z = preço (β) do meio de produção (z), gerado pelo trabalho.

r_j = preço (r) do recurso natural (j).

De acordo com o teorema da dualidade forte (Acher; Gardelle, 1978, p. 31-33), com as soluções ótimas temos,

$$\text{mínimo } \sum c_i^l q_i^l + \sum c_z^x m_z^x = \text{máximo } \sum D_i p_i + \sum M_z \beta_z - \sum R_j r_j \quad (24)$$

ou seja, o valor em tempo de trabalho socialmente necessário para a produção corresponde, quantitativamente, ao seu valor monetário, determinado pelos preços. É interessante salientar, porém, que para isto é necessário subtrair as rendas definidas a partir dos preços dos recursos naturais do valor monetário total, definido a partir dos preços dos produtos gerados pelo trabalho. Os preços fornecidos pelo modelo, portanto, incluem redistribuições do valor (em tempo de trabalho), não podendo ser reduzidos a estes.

De acordo com o teorema fundamental da programação linear (Boldrini et al., 1980, p. 368), o número de variáveis na solução ótima corresponde ao número de restrições ativas no problema. Assim, no modelo apresentado, o número de atividades na solução ótima é igual ao número de restrições que a limitam. Isto implica que, dentre as restrições do problema dual, apenas as restrições

ativas, em que as desigualdades se tornam igualdades, correspondem às técnicas que constam na base ótima do problema primal. Essas técnicas, individualmente, são as únicas que permitem que o valor agregado monetário seja equivalente ao valor em tempo de trabalho diretamente aplicado na produção. Para as técnicas que não constam na solução, o valor agregado monetário é inferior ao tempo de trabalho diretamente aplicado. Isto pode ser ilustrado por meio de um exemplo numérico elaborado a partir dos dados mostrados nas tabelas 4, 5 e 6. Assim, para o meio de produção 1 gerado por meio da técnica 1, considerando a aplicação de 40 unidades de trabalho, obteríamos $40/2 = 20$ unidades físicas do meio de produção, cujo valor monetário é $20 \cdot 17,5 = 350$ unidades. Para gerar 20 unidades físicas do meio de produção 1 por meio da técnica 1, conforme a tabela 4, seriam necessárias $20 \cdot 1 = 20$ unidades de recurso natural, cujo valor monetário seria $20 \cdot 0,5 = 10$ unidades; além de $20 \cdot 0,4 = 8$ unidades de meio de produção 2, cujo valor monetário seria $8 \cdot 20 = 160$ unidades e $20 \cdot 0,5 = 10$ unidades de meio de produção 3, cujo valor seria $10 \cdot 14 = 140$ unidades monetárias. Assim, a aplicação de 40 unidades de trabalho para gerar o meio de produção 1 com a técnica 1 geraria $350 - 10 - 160 - 140 = 40$ unidades de valor agregado monetário. Aplicando o mesmo cálculo para o caso do meio de produção 1 gerado por meio da técnica 2, considerando também neste caso a aplicação de 40 unidades de trabalho teríamos $175 - 2,5 - 40 - 98 = 34,5$ unidades monetárias, ou seja, a aplicação de 40 unidades de trabalho proporcionaria apenas 34,5 unidades monetárias de valor agregado. A técnica 2, assim, seria menos eficiente economicamente do que a técnica 1, razão pela qual está excluída da base ótima, conforme mostra a tabela 5.

Portanto, o valor agregado nas unidades de produção é um critério eficiente para a escolha de técnicas que permitem que no conjunto da economia o trabalho socialmente necessário à produção seja minimizado e o valor monetário da produção seja maximizado, sendo ambos, nesta situação, quantitativamente equivalentes, conforme descreve a expressão (24). Estes resultados indicam que os preços a partir dos quais são calculados os valores monetários, nas condições descritas pela expressão (24), constituem-se em informações que permitem que as decisões microeconômicas, relativas à escolha das técnicas de produção, sejam coerentes com as decisões macroeconômicas (resultantes essencialmente da luta de classes), relativas a demanda de produtos finais, ao crescimento econômico e ao uso dos recursos naturais. Neste sentido, é importante salientar que a demanda de produtos finais, representada pela variável (D), o excedente de meios de produção necessário para satisfazer um aumento da demanda (crescimento econômico), representado pela variável (M) e o recurso natural disponível, representado pela variável (R), são expressos em unidades físicas, correspondendo, portanto, a riquezas e não a valores (em tempo de trabalho ou monetário). Tais variáveis são exógenas ao modelo, isto é, os seus valores não são fornecidos pela sua solução, mas são dados de entrada para o cálculo da mesma. Assim, o processo de formação dos preços descrito pelo modelo indica que, devido ao caráter qualitativo das riquezas, a sua produção e o seu consumo não podem ser definidos

pelos preços, mas, ao contrário são estes que são definidos a partir das decisões tomadas na sociedade sobre a produção e o consumo das suas riquezas físicas. Isto implica que a integração das riquezas físicas na circulação econômica por meio dos preços ocorre a partir da sua consideração como elementos exógenos ao processo econômico propriamente dito na medida em que este, vale salientar, é qualitativamente distinto dos processos naturais que se encontram na origem das riquezas materiais. Assim, de acordo com a estrutura do modelo apresentado, os processos que determinam a produção e o consumo de riquezas por uma sociedade não podem ser reduzidos a questões de ordem meramente técnica, embora eles devam se subordinar as restrições técnicas existentes à produção. Mas estas restrições técnicas jamais podem, por si mesmas, determinar o resultado de tais processos. As funções objetivo dos problemas primal e dual do modelo, portanto, só podem possuir um caráter meramente operacional.

Por outro lado, pode-se alegar que, pelo menos do ponto de vista ambiental, a própria escassez dos recursos naturais poderia assegurar uma exploração adequada dos mesmos, ao provocar o aumento dos seus preços e, assim, induzir a adoção (e a geração) de técnicas poupadoras em recursos naturais. Neste caso, os principais obstáculos à sustentabilidade estariam na insuficiência do progresso técnico e, principalmente, em interferências externas (como, por exemplo, intervenções do Estado) nos mecanismos econômicos relacionados à formação dos preços. Neste sentido, os processos econômicos por si mesmos, desde que “livres” de qualquer intervenção, seriam capazes de assegurar as condições para a sustentabilidade ecológica das sociedades humanas.

Mas nada assegura que o nível de exploração dos recursos naturais considerados escassos não possa provocar um grau de destruição de riquezas que ultrapasse a capacidade dos sistemas naturais em renová-las, ou de assegurar um ritmo compatível entre o seu grau de exploração e as condições para a sua substituição, no caso de recursos não renováveis. Isto porque a escassez de recursos naturais é definida em função das atividades humanas e não, pelo menos imediatamente, pela dinâmica dos sistemas naturais, a qual não depende dos processos econômicos (embora possa ser perturbada pelos mesmos), mas é definida por complexos mecanismos de auto-organização baseados em transformações irreversíveis de energia. Tais mecanismos implicam na necessidade de um constante abastecimento e transformação de energia de baixa entropia, assim como pela manutenção da biodiversidade e por um adequado funcionamento dos ciclos biogeoquímicos (do carbono, do nitrogênio e do oxigênio, por exemplo) assegurado pelos sistemas naturais. Como discutido na primeira seção deste artigo, os sistemas econômicos possuem, de um ponto de vista físico-químico, as mesmas características energéticas dos sistemas naturais. No entanto, não há processos naturais de regulação entre o funcionamento dos sistemas econômicos e o dos sistemas naturais de forma que estes últimos possam automaticamente assegurar a sustentabilidade dos primeiros. Isto porque a escassez de recursos naturais pode vir a exercer uma influência significativa sobre os processos

econômicos somente após a sua exploração atingir níveis incompatíveis com a sustentabilidade das sociedades humanas. A consideração neste artigo de que as riquezas físicas são variáveis verdadeiramente exógenas, cujas quantidades a serem utilizadas não podem ser determinadas por considerações exclusivamente econômicas, é coerente com esta interpretação.

Aplicações práticas do modelo

O modelo básico apresentado na seção anterior pode ser reformulado para versões mais realistas, com a inclusão de meios de produção que exigem mais de um ciclo de produção para serem consumidos (o que gera a formação de estoques) e a possibilidade de certos produtos de consumo final exigirem recursos naturais diretamente, como no caso da terra na agricultura (Silva Neto, 2021). Tais modelos podem fornecer informações interessantes sobre o impacto no sistema de preços da escassez de recursos naturais (ou de restrições voluntárias da sua exploração), do aumento do investimento em fontes de energias renováveis, etc.

Como mostrado anteriormente, o problema primal do modelo foi elaborado com base no tempo de trabalho. Isto dificulta a sua aplicação prática pois exige dados de tempo de trabalho dificilmente disponíveis, além de dificultar a relação dos preços obtidos com os vigentes de acordo com o sistema monetário corrente. No entanto, de acordo com o modelo o valor agregado corresponde ao equivalente monetário do tempo de trabalho. O emprego do valor agregado pode ser considerado, pelo menos de um ponto de vista conceitual, como equivalente ao modelo original, o que facilita significativamente a aplicação prática do modelo na medida em que neste os preços são obtidos diretamente em moeda corrente. Por outro lado, como o valor agregado é calculado a partir dos preços, é evidente que a solução do problema dual do modelo em sua versão monetária fornece os mesmos preços empregados para o cálculo do valor agregado, ou seja, o modelo básico torna-se tautológico, com todas as técnicas sendo indicadas como eficientes¹. No entanto isto não retira a utilidade prática do modelo para a análise do impacto da alteração dos seus parâmetros sobre o sistema de preços. O modelo coloca, assim, a possibilidade de uma planificação ecológica por meio de mecanismos econômicos, os quais poderiam tornar o emprego de técnicas mais compatíveis com a sustentabilidade interessantes de um ponto de vista microeconômico².

Conclusão

A discussão realizada neste artigo permite concluir que a consideração explícita dos fluxos físicos de matéria e de energia na análise do processo de reprodução econômica pode ser realizada de

¹ O que de um ponto de vista formal não é possível. Na programação linear o número de variáveis da base ótima é igual ao número de restrições ativas. Por exemplo, no problema dual o número de variáveis da função objetivo é menor do que o número de restrições, o que formalmente impossibilita que todas as alternativas técnicas sejam eficientes.

² Aplicações do modelo em sua versão monetária são realizadas por Silva Neto (2021).

maneira formalmente consistente, desde que a economia seja reconhecida como um sistema aberto, de natureza fundamentalmente termodinâmica. Além disto, a aplicação prática do modelo não apresenta dificuldades particulares na medida em que ele pode ser elaborado em moeda corrente. O modelo permite colocar a possibilidade de uma planificação ecológica diretamente baseada e fluxos físicos.

Referências

- ACHER, J. ; GARDELLE, J. **Programmation linéaire**. Paris: Dunod, 1978.
- BOLDRINI, J. L.; COSTA, S. I. R.; FIGUEIREDO, V. L.; WETZWER, H. **Algebra Linear**. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1980.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. **The Entropy Law and the Economic Process**. Cambridge, MA: Harvard Economic Press, 1971.
- GRIBBIN, J. **Deep simplicity: bringing order to chaos and complexity**. New York: Random House, 2004.
- GÜEMEZ, J.; FIOLEAIS, C. e FIOLEAIS, M., **Fundamentos de Termodinâmica do Equilíbrio**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1998.
- HARRIBEY, J.-M. Au coeur de la crise sociale et écologique du capitalisme: la contradiction entre richesse et valeur. **Actuel Marx**, nº 57, p. 173-185, premier semestre 2015.
- LUKÁCS, G. **Prolégomènes à l'ontologie de l'être social**. Paris: Éd. Delga, 2009.
- MAZOYER, M.; ROUDART, L. **Histoire des Agricultures du Monde. Du Néolithique à la Crise Contemporaine**. Paris: Éd. du Seuil, 1997.
- PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. **La nouvelle alliance. Métamorphose de la science**. Paris: Ed. Gallimard, 1986.
- PRIGOGINE, I. **Les lois du chaos**. Paris: Flammarion, 1993.
- SILVA NETO, B. Desenvolvimento sustentável: uma abordagem baseada em sistemas dissipativos. **Ambiente & Sociedade**, vol. 11, n. 1, p. 15-31, 2008.
- SILVA NETO, B. A importância das rendas diferenciais na teoria dos preços de Marx. **Desenvolvimento em Questão**, ano 16, número 44, , p. 9-41, jul/set 2018.
- SILVA NETO, B. A internalização dos custos da transição agroecológica em sistemas agrários. Porto Alegre: Ed. Fi, 2021.