



9º ENEDS

ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA
E DESENVOLVIMENTO SOCIAL



“O Brasil que se quer e os caminhos que se trilham”

A Entropia e uma Nova Responsabilidade

Área Temática: Engenharia e Sustentabilidade

Antônio C. G. de Sousa

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro-RJ - ac@del.ufrj.br

Resumo

Os modelos clássicos dos processos produtivos apresentam a circulação dos valores monetários e bens entre empresas, mercado de bens e serviços, famílias e mercado de fatores de produção, sem apresentar fluxos que comuniquem os processos produtivos com a natureza. Ao mesmo tempo não levam em consideração a segunda lei da termodinâmica, que implicou na consideração do tempo como unidirecional para os processos submetidos à entropia. Este texto analisa as consequências da utilização destes modelos e discute um modelo que considera a entropia no processo produtivo assim como a inserção deste último na natureza. Este modelo considera o processo produtivo como um sistema aberto, portanto, com trocas de energia e matéria entre o sistema produtivo e a natureza, seu ambiente, um sistema fora do equilíbrio, complexo, com qualidades que são encontradas apenas no todo e não nas partes. A partir do novo modelo são discutidas a crise da energia, a degradação do meio ambiente e as novas responsabilidades para com o futuro.

Palavras-chave: Entropia; Desenvolvimento sustentável; Modelo econômico; Sistema aberto; Sistema complexo.

1 Introdução

No caminho para estabelecer a Economia como uma ciência, seu escopo foi definido como o estudo da produção de bens para a humanidade e algumas questões centrais foram colocadas, como quais são os fatores envolvidos no processo de produção e consumo, como é produzida a riqueza, como se dá o crescimento econômico como se estabelece o valor das mercadorias. As respostas a estas questões foram definindo o sistema econômico, ou os processos produtivos, levando à elaboração de modelos desse sistema. Neste texto analisamos o modelo clássico da economia e sua evolução até o sistema chamado de sintético neoclássico, criticando a não consideração da entropia no sistema econômico, o que leva a ignorar completamente a natureza no processo de produção. A partir desta crítica apresentamos um novo modelo incluindo a relação do sistema econômico com a natureza, e discutimos as consequências deste novo modelo, que exige um comprometimento com o futuro das novas gerações.

Na seção dois apresentamos o modelo clássico da economia, e na seção três um novo modelo de acordo com o segundo princípio da termodinâmica. Na seção quatro discutimos as principais controvérsias sobre os modelos. Na seção cinco apresentamos os problemas da



poluição e da crise da energia sob o ponto de vista dos dois modelos, e na seis a responsabilidade para com o futuro colocado claramente pelo novo modelo.

É importante salientar que a grande contribuição à crítica da teoria clássica da Economia foi apresentada por Micholas Georgescu-Roegen (1971) e, portanto, seus trabalhos embasam este texto, assim como os textos de Cechin (2010) e Carpintero (2006). Na parte histórica foi de valia o livro de Mankiw (2001), que apesar de seguir o modelo clássico, faz uma excelente recompilação histórica da evolução da Economia.

2 O Modelo clássico do processo produtivo

O modelo clássico do sistema produtivo foi definido como um sistema isolado, com fluxos de valores monetários e bens, como está representado na figura 1.

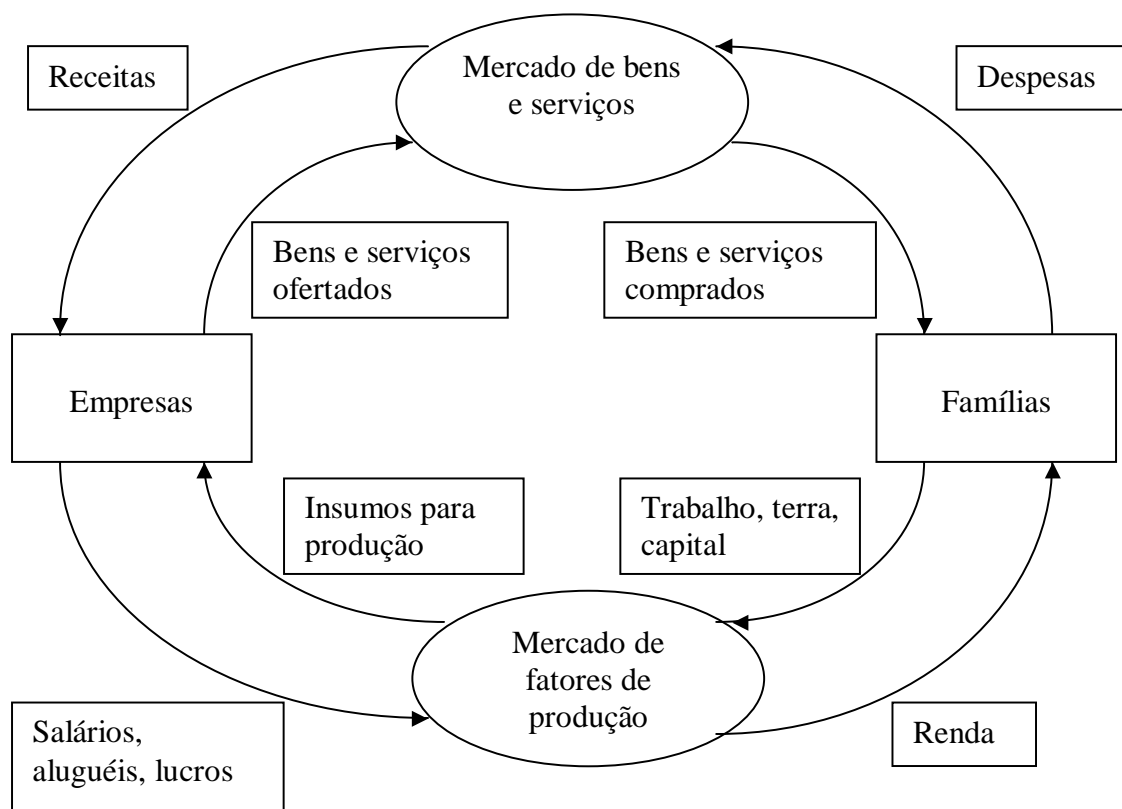


Figura 1 – Diagrama do processo de produção, baseado em MANKIW (2001).

Para se chegar a este modelo foram considerados como insumos para a produção, ou fatores de produção, o trabalho, a terra e o capital. Com estes insumos as empresas produziam bens que eram oferecidos no mercado de bens e serviços. As famílias consumiam estes bens e serviços, e por sua vez ofereciam no mercado de fatores de produção trabalho, terra e capital. Assim se formava o fluxo interno de bens e serviços do modelo, e externamente havia outro fluxo, em sentido contrário, de valores monetários.



9º ENEDS

ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA
E DESENVOLVIMENTO SOCIAL



“O Brasil que se quer e os caminhos que se trilham”

Em 1776 Adam Smith (1996), em “A riqueza das nações”, propôs que a riqueza era criada pelo trabalho, substituindo as visões anteriores da riqueza criada pelo comércio e depois pela agricultura. O aumento de capital foi atribuído à acumulação de capital pelo lucro, e o aumento da produção pelo aumento da produtividade do trabalho. Ele propunha que o estado não interviesse, e que a economia seria regulada “pela mão invisível do mercado”.

Nesta época já estava colocado o problema do crescimento. Para Adam Smith a oferta fixa de terra limitaria o crescimento da população. Thomas R. Malthus (1996) considerava que os retornos da produção agrícola seriam decrescentes a longo prazo, se a população crescesse cairia o padrão de vida, o que levaria a uma estabilização da população, chegando a um estado estacionário.

John Stuart Mill (1996) considerava que o progresso técnico permitiria satisfazer as necessidades materiais da humanidade, e a sociedade estaria livre para perseguir outras metas sociais e atingir um padrão elevado de vida.

Marx (1971) considerava que a técnica poderia resolver os limites naturais; as necessidades básicas de todos poderiam ser atendidas. A autotransformação do sistema se daria em função de conflitos internos, pois a socialização da produção entraria em choque com a apropriação privada dos meios e resultados da produção: contradição das forças de produção com as relações de produção.

Marx (1971) apresentou um esquema de reprodução simples, em que os bens eram divididos em bens de capital e bens de consumo, e o fluxo de produção deveria ser suficiente para manter constantes os estoques de capital e trabalho usados na produção.

A revolução marginalista entre 1870 e 1880 utilizou técnicas matemáticas para analisar as economias, e mudou o foco de interesse para o fenômeno das trocas, abandonando o estudo da produção e seu crescimento. Passou a ser estudado como eram fixados os preços e como os bens eram trocados entre os indivíduos: o sistema estaria em equilíbrio quando as pessoas não quisessem mais trocar, o que se daria quando todos estivessem satisfeitos dados os preços e os bens disponíveis. Esta linha de trabalho levou à discussão do autointeresse, que levaria os indivíduos a maximizarem a utilidade dos bens, para atender à satisfação pessoal proporcionada pelo consumo. O problema então passou a ser encontrar a maximização da utilidade, dos bens e serviços, tendo em vista a limitação de recursos.

Para os clássicos os valores eram determinados pela produção, e na na visão dos marginalistas os preços eram fixados pela procura. Alfred Marshall (1996) juntou a resposta dos clássicos com a dos marginalistas, propondo que o preço era determinado quando a oferta encontra a demanda. Esta microeconomia do estudo dos comportamentos dos consumidores e dos produtores passou a ser conhecida como neoclássica.

Em nova evolução o núcleo teórico passou a ser a teoria da escolha, a alocação de recursos escassos entre fins alternativos. Abusca de uma função matemática para maximizar sob restrições passou a ser o problema central da economia.

Com a crise de 1929 John Maynard Keynes (citado por MANKIWI, 2001) apresentou uma explicação para as flutuações da economia e um programa de políticas monetárias e fiscais a serem seguidas pelos governos para evitar as crises cíclicas. Era o retorno a uma visão macroeconômica com o objetivo de manter o crescimento econômico.



9º ENEDS

ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA
E DESENVOLVIMENTO SOCIAL



"O Brasil que se quer e os caminhos que se trilham"

Paul Samuelson (1976) foi quem tratou de combinar a economia neoclássica com Keynes, gerando o que passou a ser chamado de síntese neoclássica.

Faltava ainda conciliar o crescimento com o equilíbrio, e isto foi proposto por Solow (1956), ao considerar que os fatores capital e trabalho são intercambiáveis: avanços tecnológicos proporcionam maior produtividade do capital, aumentando a taxa de crescimento econômico e a renda per capita.

3 Novo Modelo para o Sistema Econômico

Até aqui todas estas teorias utilizavam o modelo apresentado acima, de fluxos contínuos de valores monetários e bens, os dois em sentidos inversos. Seguem o modelo mecanicista da física no século XVIII. Esse modelo recebeu uma crítica contundente de Georgescu (1971), onde ele demonstrava que o modelo contrariava a segunda lei da termodinâmica, a entropia, pois criava um moto perpétuo irreal. Não se podem realizar transformações na natureza sem perda de energia na forma de calor que se dissipa. Este princípio da termodinâmica introduziu uma novidade epistemológica: a flecha do tempo. Na natureza não há ciclo contínuo, e o tempo termodinâmico não é o tempo mecânico. Na mecânica o tempo pode ser negativo, os fenômenos podem ser reversíveis. Na termodinâmica os fenômenos são irreversíveis. Há portanto uma história, o tempo tem orientação. Portanto um sistema isolado, pela entropia, entraria em degradação energética, chegando a um ponto em que a energia existente não poderia mais produzir trabalho. Falta no modelo uma entrada de energia para que ele possa funcionar.

O processo de produção realiza transformações sobre materiais da natureza, originando bens e serviços. No modelo clássico não é apresentada a entrada de materiais da natureza, nem é mostrada a saída de resíduos do processo de produção para a natureza, pois mesmo que exista a reciclagem, ela não é completa, há perda de materiais na forma de rejeitos. O processo produtivo extrai da natureza materiais com baixa entropia, e devolve materiais degradados, com alta entropia.

Cabe aqui uma explicação. A entropia é também uma medida da degradação da energia em sistemas. A cada transformação há uma perda de energia na forma de calor, ocasionando o aumento da entropia. Quanto maior a entropia, menos possibilidade um sistema tem de utilizar sua energia para produzir trabalho, daí dizer-se que houve uma degradação da energia. Baixa entropia significa alta capacidade de uma energia de produzir trabalho. A energia elétrica é uma forma de energia de baixa entropia, e o calor é a forma de energia de mais alta entropia. Para exemplificar, quando um motor elétrico gera movimento, ele tem alta eficiência, e uma pequena parte da energia gasta no motor se dissipa na forma de calor, não produzindo trabalho útil. As máquinas térmicas tem baixa eficiência, portanto perdem muita energia sem produzir trabalho.

Retornando então à crítica ao modelo clássico do processo de produção, pode-se concluir que faltam mais dois fluxos de matéria entre o sistema e o ambiente externo, a natureza. Um fluxo da natureza para o sistema representando os materiais da natureza que o processo de produção utiliza como insumos, e um fluxo do sistema para a natureza com os rejeitos do processo de produção.

Os sistemas são classificados em isolados, fechados e abertos. Nos sistemas isolados não há troca de energia e matéria com o ambiente externo. Nos sistemas fechados pode haver troca



9º ENEDS

ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA
E DESENVOLVIMENTO SOCIAL



“O Brasil que se quer e os caminhos que se trilharam”

de energia com o ambiente externo, mas não há troca de matéria. Nos sistemas abertos há troca de energia e matéria com o ambiente externo. A terra é um sistema fechado, pois troca energia com o ambiente externo. Recebe energia do sol e emite energia. O sistema de produção é aberto, pois troca energia e matéria com a natureza, que é seu ambiente.

Podemos agora apresentar um novo modelo, considerando as interações do processo de produção com a natureza.



9º ENEDS

ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA
E DESENVOLVIMENTO SOCIAL

“O Brasil que se quer e os caminhos que se trilham”

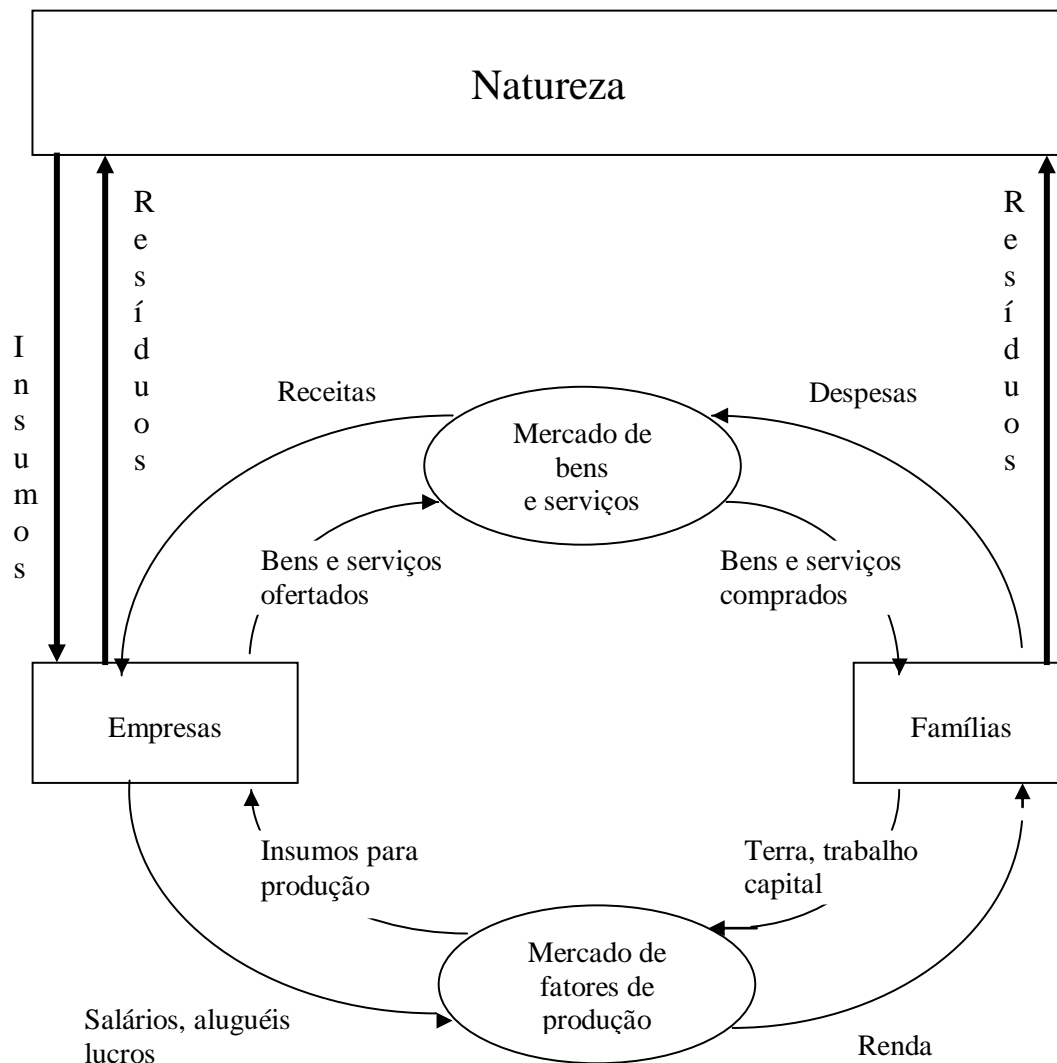


Figura 2 - Diagrama com o processo de produção como um sistema aberto

Este novo diagrama representa os fluxos de matéria e energia entre a natureza e o sistema de produção, agora um sistema aberto. O sistema produtivo recebe insumos de baixa entropia, e devolve para a natureza rejeitos de alta entropia, aumentando a entropia da terra.

No modelo clássico os insumos para a produção representam o fluxo de todos os elementos necessários à produção. Georgescu(1971) dividiu este fluxo em dois elementos: um fluxo dos insumos que são consumidos na produção, por exemplo, madeira, chapas de aço, tintas, e um fundo dos insumos que se mantem, como trabalho, capital, terra. Esta distinção é importante pois ao se discutir a possibilidade de substituir um insumo por outro, deve-se levar em consideração que fluxos e fundos são de natureza distinta.



9º ENEDS

ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA
E DESENVOLVIMENTO SOCIAL



“O Brasil que se quer e os caminhos que se trilham”

4 Controvérsias

O novo modelo deixa mais claro os problemas que o atual sistema de produção está criando para o futuro: a depleção dos recursos naturais utilizados como fontes de energia ou de insumos materiais para a produção, e o aumento dos rejeitos de alta entropia. Apesar de já existir uma consciência generalizada de que esses problemas são reais, há dificuldades para tratá-los porque há resistências e teóricos e técnicos que procuram minimizar as consequências desses problemas.

Alguns economistas (SOLOW, 1956) alegam que a depleção de um material fará com que ele seja substituído nos processos produtivos por outros produtos, mantendo-se o nível de produção e de consumo. Como nos modelos econômicos todos os fatores de produção são medidos em valores monetários, sob o ponto de vista econômico realmente um material esgotado poderia ser substituído por outro, e mais, poderia haver substituição também entre capital e trabalho. Mas no mundo real nem todos os insumos podem ser trocados entre si, e uma propriedade que se exige de todo modelo é que ele tenha relação com os elementos do mundo real (GEORGESCU, 1971). Uma mudança quantitativa no uso de um capital levará a uma mudança qualitativa deste capital, e a produção não se manterá constante.

Discute-se na engenharia a inovação como a saída para a depleção dos recursos naturais. Mowery (2005) apresenta um caso em que isto foi possível. Na segunda guerra os Estados Unidos ficaram isoladas das suas fontes de borracha natural, e para a sociedade americana e seu esforço de guerra a borracha era indispensável. O governo fez um enorme aporte de financiamentos, menor apenas que os realizados no Projeto Manhattan, na época, e em dois anos a borracha sintética, que já existia, porém com problemas para sua produção e uso, estava em uso industrial. A questão que se coloca é que foi substituído um produto baseado em material renovável, a borracha, por outro baseado em material não renovável. Esta mudança aumenta o consumo dos derivados do petróleo, resolvendo momentaneamente o problema. Pode-se voltar novamente à borracha natural, mas este caso não pode então ser apresentado como um exemplo da substituição de material da natureza substituído por outro obtido por inovação, pois a substituição é transitória.

A inovação tem um papel importante na história da humanidade, mas não como ela é apresentada hoje. O modelo clássico da economia é baseado na mecânica, pois o movimento de materiais ou valores monetários se dá em ciclos eternos. Na mecânica o tempo pode ter valores negativos, pode-se retornar no tempo. Ao ser introduzida a entropia passou-se para um modelo termodinâmico com uma “flecha do tempo” onde não há ciclos sem aumento da entropia. Cechin (2010) ao apresentar as correntes atuais na economia, relata o crescimento da utilização do darwinismo na economia, baseado nos princípios de variação, herança e seleção. Da mesma forma que o sistema biológico, o sistema produtivo humano seria um sistema aberto, complexo e evolutivo. A variação, que na biologia é motivada por mutações genéticas, na economia é motivada pela inovação humana. Portanto a inovação é uma característica fundamental nos seres humanos e está na base da evolução da sociedade humana. É contraditório que a inovação, elemento central para a história humana, seja utilizada para justificar posições que são contraditórias com a evolução.

5 Poluição e crise energética

No novo ciclo econômico foi incluído um fluxo do sistema produtivo para a natureza, que significa os rejeitos do processo de produção e o aumento da entropia na terra. Este fluxo



9º ENEDS

ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA
E DESENVOLVIMENTO SOCIAL



“O Brasil que se quer e os caminhos que se trilham”

coloca dois novos problemas: a poluição e a depleção dos recursos energéticos não renováveis.

A poluição está sendo combatida com a reciclagem dos materiais e mudanças nos processos de produção para materiais recicláveis e não poluentes. São medidas importantes, mas não eliminam completamente os resíduos. A entropia representa a degradação da energia pela transformação de energias com baixa entropia em energias com altas entropias, com dispersão de energia na forma de calor. No caso dos rejeitos nem todos são possíveis de serem recuperados pela dispersão dos mesmos. Nunca se obtém 100% de reciclagem de materiais. Portanto a reciclagem diminui mas não elimina a perda de materiais.

Sobre a energia já foi colocada a degradação da energia. Há pesquisas em energias renováveis que tentam resolver este problema e que são fundamentais. Podem permitir que se aumente a utilização da energia solar que recebemos de várias formas sem impactos no meio ambiente.

A energia hidráulica é renovável, mas as grandes barragens tem fortes impactos ambientais que tem levado a uma luta contra as novas hidroelétricas, como é o caso de Belo Monte no Xingu. Pode ser que no futuro essas obras sejam realizadas com menos impactos ambientais, a partir da valorização do meio ambiente, mas ainda não chegamos nesta etapa em nenhum país, nem sabemos se chegaremos a esta valorização em médio prazo.

A energia atômica apresenta riscos ambientais e humanos consideráveis. A falta de confiança nos empreendimentos nucleares pelos acidentes ocorridos e pela possível minimização de custos que levem aos limites de segurança legais, implicam em fortes oposições políticas a esta forma de produção de energia.

Uma fonte que está sendo estudada para aplicações gerais, e com possibilidades de aplicação em equipamentos eletrônicos portáteis possivelmente até 2025 (CGEE, 2010), é baseada na tecnologia do hidrogênio. Esta tecnologia ainda tem problemas técnicos e econômicos para sua produção, armazenamento, transporte, distribuição e conversão, mas está recebendo atenção especial por ser possível utilizá-la em conjunto com outras fontes de energia que não possuam constância em suas produções, como as energias eólica e solar

Outras formas renováveis de energia, como fotovoltaica, eólica, aquecimento solar, das ondas, geotérmica e outras que apareçam, ainda não são suficientemente eficientes ou constantes para resolver o problema energético sem criar outros problemas para o meio ambiente e o aumento da entropia na terra.

Uma apresentação do panorama da energia no Brasil pode ser encontrado em Macedo (2003), com dados do cenários mundial, a matriz energética brasileira, as pesquisas na área e as perspectivas para os próximos vinte anos.

6 Conclusões

Do que foi colocado acima surgem algumas responsabilidades para a Engenharia e para a Extensão Universitária. A primeira é a colocação das bases científicas, técnicas, sociais e políticas para os problemas. Por exemplo, nos trabalhos sobre reciclagem deve-se colocar a importância da reciclagem para o meio ambiente, mas também discutir politicamente o problema, mostrando que apenas reciclando “estaremos enxugando gelo”. Ao lado da reciclagem devemos discutir os processos de produção para que diminuam os rejeitos e sejam utilizados materiais recicláveis.



9º ENEDS

ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA
E DESENVOLVIMENTO SOCIAL



“O Brasil que se quer e os caminhos que se trilham”

Em uma economia de mercado como a nossa, a concorrência induz as indústrias a baratarem seus custos de produção. Desta forma o critério para a seleção dos materiais será o de menor custo, independente do fator poluição. Para combater a poluição não basta portanto desenvolvermos novos materiais e novas técnicas. Será necessário, também, obrigar através de leis e políticas públicas a utilização de materiais não poluentes, ou menos poluentes. A luta por leis e políticas públicas deve fazer parte de nosso horizonte de atuação.

A Engenharia e a Extensão Universitária tem responsabilidades para com o futuro, pensar o presente pensando no futuro, e certamente este é um pensar e um agir difícil. Apesar de todos os avanços técnicos a fome e a guerra continuam no mundo, mostrando que falta a responsabilidade para com o mundo atual. Se não vemos o que acontece hoje, como vamos abrir mão de privilégios, confortos, seguranças em nome de um mundo futuro, em nome de pessoas que ainda não existem, que não conhecemos, e possivelmente não conheceremos? Para resolver os problemas do mundo futuro devemos começar pelo de hoje e buscar a origem dos males que nos afligem. A discussão dos modelos dos processos econômicos apresentados acima se insere nesta perspectiva.

O novo modelo considera que o processo de produção é um sistema aberto, fora do ponto de equilíbrio e complexo, portanto com propriedades que estão apenas no sistema como um todo, o que o diferencia dos modelos clássicos.

O capitalismo pela economia de mercado está baseado em um mecanismo de seleção em que as inovações que significam aumento na produtividade das empresas são selecionadas, com o predomínio das empresas que as utilizam e destruição das demais. O dinamismo do capitalismo advém desta seleção realizada pelo mercado sobre as empresas pelo hoje, o aqui e o agora, nunca pelo futuro nem por uma visão do que é melhor para a humanidade, mesmo que seja só para o momento atual. Esta foi a fonte do enorme dinamismo do capitalismo e do conseqüente desenvolvimento da técnica. O problema é que a seleção nas partes não significou que o sistema como um todo tivesse uma seleção positiva. Não está na dinâmica do capitalismo uma visão global de futuro para a humanidade. A visão de futuro sempre é pequena e limitada. Esta visão imediatista e egoísta leva a que as decisões não levem em consideração o futuro. Só superando uma economia em que o mercado seja o mestre poderemos ter uma nova sociedade em que o futuro seja um elemento de decisão importante.

Hoje as empresas, através da publicidade, superaram a etapa em que estudavam seus consumidores para vender mais. Agora elas forjam seus consumidores através de uma propaganda pesada, que procura moldar a satisfação dos mesmos pelo consumo de seus produtos. As pessoas são consumidoras e só podem se satisfazer no consumo. É o aqui e o agora egoísta.

Para mudar teremos uma luta longa pela frente, onde pelos projetos de extensão, como os que se discutem neste congresso, poderemos desenvolver ideias e participar da organização da sociedade civil, pois só com um salto de qualidade na intervenção das pessoas organizadas nas formas possíveis poderemos ultrapassar esta etapa da humanidade. É uma tarefa de todos.

7 Referências Bibliográficas

CARPINTERO, Oscar. *La bioeconomia de Gergescu-Roegen*. Espanha: Novagràfik, 2006.

CECHIN, Andrei. *A natureza como limite da economia. A contribuição de Nicholas Georgescu-Roegen*. São Paulo: Editora Senac São Paulo/Edusp, 2010.



9º

ENEDS

ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA
E DESENVOLVIMENTO SOCIAL



“O Brasil que se quer e os caminhos que se trilham”

CGEE. Hidrogênio Energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010 – 2025. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 2010. *Série de Documentos Técnicos* nr 7.

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. *The entropy law and the economic process*. Cambridge, Massachussets: Harvard University Press, 1971.

MACEDO, Isaias C. de. *Estado da arte e tendências tecnológicas para a energia*. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 2003.

MALTHUS, Thomas R. *Princípios de Economia Política (1798) e Ensaio sobre a população (1798)*. São Paulo: Editora Nova Cultural Ltda, 1996. (Os Economistas).

MANKIW, Gregory N. *Introdução à Economia: princípios de micro e macroeconomia*. São Paulo: Elsevier, 2001.

MARSHALL, Alfred. *Princípios de Economia*. 1890. São Paulo: Editora Nova Cultural Ltda, 1996. (Os Economistas).

MARX, Karl. *O Capital: crítica da Economia Política*. Livro 1, Volume1. Rio de Janeiro, Civilização Brasileira, 1971, 1ª. Ed. 1867.

MILL, John Stuart. *Princípios de Economia Política*. 1848. São Paulo: Editora Nova Cultural Ltda, 1996. (Os Economistas).

MOWERY, David C.; ROSENBERG, Nathan. *Trajatórias da inovação*. Campinas: Editora da Unicamp, 2005.

SAMUELSON, Paul A. *Economics*. Nova York: McGrawHILL, 1976.

SMITH, Adam. *A riqueza das nações*. 1776. Vol. I e II. São Paulo: Editora Nova Cultural Ltda, 1996. (Os Economistas).

SOLOW, Robert M. A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 70, nr.1, 1956.