

Um Modelo Dinâmico de Recursos Exauríveis: A Interação Econômica entre Água e Energia

Alexandre Stamford da Silva

Doutor em Economia e professor assistente, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Fernando Menezes Campello de Souza

Ph.D em Engenharia de Sistemas, Cornell University, Ithaca, New York.

Professor titular do Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Resumo

Aborda o problema dos usos múltiplos da água através de um modelo de controle ótimo. A peculiaridade em se estudar a água como um recurso escasso devido aos seus múltiplos usos reside no fato de que esta é usada diretamente como insumo para a produção de bens de consumo não-energéticos e também como insumo para outro insumo (a energia elétrica) para então produzir novamente bens de consumo não-energéticos. Deve haver uma substitutibilidade gradual da fonte energética que utiliza a água como insumo. O custo de oportunidade da água diminui com o aumento do preço da energia e com a substitutibilidade entre trabalhadores do setor explorador da água e do setor não-energético. O preço da água deve ser pelo menos o dobro do preço dos energéticos. O valor acima do dobro dependerá da relação entre os custos das empresas extratoras de água e das empresas geradoras de energia hidrelétrica. As empresas que se dediquem a explorar a água devem pagar duas taxas, que já devem estar incorporadas ao preço do produto, mas deverão ser usadas para objetivos distintos. Uma taxa deve ser recolhida pelo setor responsável pelo gerenciamento hídrico, ao passo que a outra deve ser cobrada pelo setor responsável pelos investimentos energéticos.

Palavras-Chave:

Recursos Exauríveis; Energia - Uso; Água - Uso;

1- INTRODUÇÃO

Há muito tempo os recursos exauríveis são objetos de estudo. Várias contribuições já foram expostas por diversos autores e novas contribuições estão sempre aflorando nesse campo. As preocupações são, em geral, com minas de recursos fósseis ou com lençóis de água subterrânea. Entretanto, em tais trabalhos não existe o problema de concorrência entre usos diversos do recurso que está sendo extraído, pelo menos no tocante à taxa de extração.

O Brasil é um País em desenvolvimento e tem uma matriz energética bastante peculiar. A energia do Brasil é muito dependente dos recursos hídricos. Entretanto, esse insumo tem outros usos concorrentes. Apesar da energia hidrelétrica ser classificada como uma fonte de energia renovável, isto não a isenta de ser uma fonte de energia de recursos limitados, sujeita às mesmas dinâmicas das fontes de combustíveis fósseis ou dos lençóis de água subterrânea.

A diferença de tratamento da água como um recurso escasso devido aos seus múltiplos usos está no fato de que esta é usada diretamente como insumo para a produção de bens de consumo não-energéticos e também como insumo para outro insumo (a energia elétrica), para então produzir novamente bens de consumo não-energéticos. No caso do Brasil este problema tem alta importância, pois mais de 90% da energia elétrica consumida no país provém de fontes de energia hidráulica.

O presente trabalho propõe-se a dar os primeiros passos no sentido de se entender as implicações econômicas dessa troca de águas para a produção de bens de consumo não-energéticos e energéticos.

2 - O PROBLEMA DA ESCASSEZ DE RECURSOS NATURAIS

Com a revolução industrial e com os posteriores desenvolvimentos tecnológicos, a indústria tor-

nou-se bastante dependente da energia que, na maioria das formas atuais de geração, utiliza recursos exauríveis. Entre 1970 e 1990 o consumo de energia comercial nos países em desenvolvimento triplicou, alcançando 27% do consumo mundial (SALANT, 1995). Dessa forma, a energia (ou seus recursos exauríveis) foi o insumo produtivo que mais recebeu atenção nas três últimas décadas.

Devido aos dois choques do petróleo nos anos 70, criou-se um grande pessimismo sobre o panorama de crescimento de longo prazo. O “fantasma” da escassez de Malthus estava de volta. Esse pessimismo refletiu-se no meio acadêmico através da incorporação dos recursos energéticos exauríveis nos modelos de crescimento econômico ótimo (YANG, 1995). Os choques explicitaram ao mundo e principalmente aos grandes importadores de recursos energéticos a sua grande dependência da disponibilidade desses recursos.

A grande preocupação naquela época eram as previsões de crescimento da demanda e a falta de oferta de longo prazo para atendê-la. Os recursos naturais estavam se exaurindo por serem limitados e não pelo consumo exagerado (STIGLITZ, 1974b). Entretanto, o consumo positivo de um recurso limitado tende a exauri-lo a curto, médio ou longo prazo.

3 - ESCASSEZ OU NÃO?

Apesar da conclusão acima, as medidas atuais de escassez para os recursos fósseis não apontam – nem do ponto de vista físico nem do econômico – para a exaustão desses recursos. Usando o petróleo como exemplo em termos de reservas físicas, em 1972 sua exaustão era posta em 35 anos, 18 anos depois em 45 anos (SLADE, 1987; WORLD RESOURCE INSTITUTE, 1994), criando uma expectativa de não-exaustão entre os agentes econômicos. Dessa forma, as reservas para muitos recursos não-renováveis têm, na verdade, aumentado. A oferta tem excedido o consumo e, assim, as preocupações de exaustão não estão mais na ordem do dia.

As três variáveis econômicas mais usadas para medir a exaustão de recursos naturais, conhecidas como indicadores econômicos de escassez de recursos, são: custo de exaustão, preço e custo de uso (preço-sombra, tecnicamente falando). Esses indicadores devem sinalizar a exaustão de um recurso segundo o princípio: “se os recursos são escassos e se os alocadores de recursos (agentes econômicos) são informados dessa escassez, então os indicadores econômicos refletirão essa escassez” (KRAUTKRAEMER, 1998). No entanto, a informação de escassez não está sendo digna de crédito pelos agentes econômicos, devido às evidências empíricas supracitadas, de forma que a sinalização de escassez por esses indicadores econômicos tem falhado.

O novo foco de discussões é a utilização excessiva (não confundir com velocidade de consumo, analisada por STIGLITZ (1974) dos recursos fósseis, por eles afetarem negativamente o meio ambiente, poluindo rios, mares e o ar. Dessa maneira, a preocupação em estudar a utilização de recursos exauríveis ocorre não apenas pela falta que farão, mas também pelo mal que poderão deixar de fazer.

O que se espera, e que é atualmente o objetivo de muitos acadêmicos, é que haja uma troca de fontes de energia convencionais por fontes não-convencionais ilimitadas, como a energia solar, a eólica, a nuclear, etc. Essas tecnologias substitutas são o que se convencionou chamar de tecnologia de *backstop* na literatura corrente – uma tecnologia de alto custo que está disponível, à espera apenas da viabilidade econômica. Segundo YANG (1995), este conceito foi criado por NORDHAUS (1973). Ele é intuitivo, mas também é um resultado teórico. A idéia é a seguinte: à medida que um bem vai se exaurindo, seu custo e seu preço vão aumentando até o ponto em que seu custo torna-se maior que o custo da tecnologia de *backstop*; é quando esta entra no cenário econômico para garantir a continuidade do crescimento. ENDRESS & ROUMASSET (1994) usaram essa idéia para modificar as tão conhecidas regras de ouro, colocando-as no

contexto de recursos sustentáveis. Desenvolver as tecnologias não-convencionais e de fontes ilimitadas é tornar mais próximo o ponto de troca.

Devido à desigualdade na distribuição dos depósitos desses insumos e à concentração de produção e de consumo no mundo, existe um grande fluxo de recursos exauríveis nos mercados internacionais. Essa concentração geográfica e a falta de acesso ao recurso por outras empresas, impedindo-lhes de entrarem na indústria de extração, fazem com que essa indústria cultive elementos não-competitivos (HOTELLING, 1931). Em qualquer economia é necessário obter políticas de controle para saber qual deve ser o comportamento das variáveis relevantes dessa mesma economia. O interesse central é como crescer economicamente, continuamente e da melhor maneira possível com o que se tem, isto é, deseja-se saber qual a melhor política para um crescimento econômico ótimo e quais as condições necessárias para isso.

4 - MODELAGEM PARA OS RECURSOS NATURAIS EXAURÍVEIS

Vários autores já dedicaram parte de seu tempo ao estudo de modelos matemáticos para tratar da escassez de recursos. A economia de recursos naturais exauríveis originou-se com os trabalhos de GRAY (1914) e de HOTELLING (1931). GRAY (1914) fez a primeira análise neoclássica de conservação de recursos naturais e uma de suas principais contribuições foi a de estabelecer que a análise estática padrão era imprópria para determinar a intensidade marginal de extração de recursos exauríveis (CRABBE, 1983). Ele examinou o comportamento da oferta sobre o tempo de um extrator individual que antecipava uma seqüência de preços reais e tentava maximizar seus lucros descontados (SALANT, 1995). Dezesete anos depois HOTELLING (1931) estendeu a teoria de GRAY (1914) estabelecendo a seqüência de preços de mercado que GRAY (1914) assumiu como dada (SALANT, 1995), e escreveu: “O equilíbrio estático

na teoria econômica já está bastante desenvolvido porém não ajuda muito quando a questão central é uma reserva potencial que vai sendo consumida a uma determinada taxa..... Nesse ponto várias perguntas são formuladas, perguntas essas que só podem ser respondidas com a modelagem dinâmica” (HOTELLING, 1931). E aconselha o uso de todo o aparato matemático que trata de problemas dinâmicos, como o cálculo das variações e outros de seu tempo.

Ainda não estava disponível para HOTELLING (1931) a teoria de Pontryagin e seus colaboradores, e o famoso Princípio do Máximo, que só foi conhecido em 1962, com a publicação dos trabalhos de Pontryagin. Um dos principais trabalhos do referido cientista é citado em CHIANG (1992) “*The Mathematical Theory of Optimal Process*”. Diante das limitações teóricas da época, HOTELLING (1931) tratou de simplificar o problema ao máximo possível, utilizou a demanda sempre na forma linear (curva de demanda estacionária), expectativas de preços iguais e sem erros (previsão perfeita) para todas as firmas, custo marginal de extração constante e independente do estoque restante, e tecnologia de extração fixa. Demonstrou então, entre outras coisas, que tanto a diferença entre o preço e o custo marginal, quanto a diferença entre receita e custo marginal deveriam aumentar à taxa de desconto do mercado. Porém, no primeiro caso, a taxa seria de um mercado competitivo e, no segundo, de um monopólio. Além disso, alguns achados de seus trabalhos ficaram bastante conhecidos, como o Princípio de Avaliação de Hotelling (*Hotelling Valuation Principle, HVP*) e a regra de Hotelling (*Hotelling's rule*).

A regra ou norma de Hotelling obtida de seu modelo básico, no qual existe uma quantidade finita e conhecida de um recurso natural homogêneo, bem como um custo de extração independente do estoque restante, estabelece que o retorno de um ativo não-renovável consiste inteiramente da observação do seu custo de oportunidade e que o equilíbrio de mercado requer que

esse custo de oportunidade cresça à taxa de juros do mercado. A regra de Hotelling é considerada um resumo da teoria dos recursos não-renováveis (KRAUTKRAEMER, 1998).

O Princípio de Avaliação de Hotelling (HVP) é uma fórmula matemática bastante simples, obtida do modelo básico de Hotelling, discretizado. Ele é usado como uma forma alternativa de testar empiricamente as conclusões do modelo de Hotelling (DAVIS & MOORE, 1998). O HVP estabelece que o valor médio da reserva deve ser igual ao preço de venda, e essa afirmação é independente dos preços futuros e dos custos de extração. Desde que, como dito anteriormente, o modelo original de Hotelling não considera custos de extração dependente do estoque restante, o HPV não contém efeitos de estoque.

A fórmula básica do princípio é: $\frac{V_0}{S_0} = (P_0 - C_0)$

onde V_0 é o valor atual do estoque, S_0 é o estoque do recurso, P_0 é o preço corrente do recurso e C_0 é o custo marginal unitário de extração. Em seus esforços para avaliar os estoques das reservas de recursos naturais, vários analistas de indústrias, bem como avalistas de rendas nacionais, têm usado o HVP como uma estimativa (BUREAU OF ECONOMIC ANALYSIS, 1994). Vários trabalhos empíricos mostram que, na maioria dos casos, o HVP superestima o valor das reservas. DAVIS & MOORE (1998) e KRAUTKRAEMER (1998) citam vários desses trabalhos empíricos que suportam essa hipótese. Devido à falta de consistência do HVP original, surgiram na literatura diversas sugestões de uma nova forma para captar mais precisamente a realidade observada. No entanto, o modelo de Hotelling não é descritivo, não foi concebido para descrever a realidade; é normativo e esclarecedor, serve para ditar regras de otimalidade e para esclarecer relações que não podem ser entendidas intuitivamente (STIGLITZ, 1974a).

Apesar dos trabalhos de Gray e Hotelling datarem do início do século, suas contribuições tornaram-se clássicas. Nessas primeiras contri-

buições e também em contribuições seguintes, a variável de interesse é sempre a taxa de consumo do recurso e seu custo de oportunidade de extração. Esse custo de oportunidade assume várias nomenclaturas, cada uma refletindo seu significado. Os mais usuais são: custo de uso (*user cost*), para refletir o decréscimo da disponibilidade futura do recurso; valor local (*in situ value*), para refletir o valor marginal do estoque do recurso no local de extração; e renda do recurso (*resource rent*), para refletir a diferença entre preço e custo marginal de extração (KRAUTKRAEMER, 1998). A procura nesses trabalhos é por uma taxa de extração que é sempre endógena aos modelos. O objetivo era indicar aos donos de minas de recursos naturais a maneira pela qual eles deveriam extrair os recursos para terem o maior retorno possível ao longo do tempo. Quando o interesse é macroeconômico, envolvendo otimização de objetivos sociais, fica um tanto difícil tratar essa variável como endógena no atual estado da arte. Com a globalização das economias o controle de tal variável foge das mãos dos governantes e planejadores, pois não se tem mais controle total sobre ela, pelo menos do ponto de vista socialmente ótimo. Claro que uma intervenção governamental pode ditar taxas e regras para a extração dos recursos, porém essas intervenções serão cada vez menores devido ao rumo mundial de diminuição dos estados.

5 - CONTROVÉRSIAS NOS MODELOS

Na otimização de modelos que incluem recursos exauríveis cujo agente é a sociedade, a forma da função-objetivo surge como uma das principais discussões. O que se discute é uma das suposições implícitas na teoria do crescimento econômico ótimo – de que os indivíduos são todos iguais, não só na geração atual, mas em todas as gerações futuras. Ou seja, a geração atual se sente igualmente satisfeita em poupar uma quantidade de recursos para a geração futura ou em consumir os recursos hoje, contanto que o consumo para a geração futura seja descontado a uma determinada taxa de juros. As-

sim, as gerações são hipoteticamente indivíduos semelhantes e com os mesmos interesses, a mesma utilidade. Essa hipótese implícita foi rotulada por SOLOW (1974) como sendo utilitariana no sentido acima descrito e atribuída principalmente a Frank Ramsey. O que SOLOW (1974) discute em seu trabalho é se as críticas de Rawls¹, que sugerem uma distribuição igualitária entre gerações utilizando o critério *maximin*, tem implicações contundentes à abordagem utilitariana. O critério *maximin* preocupa-se em encontrar o maior consumo constante possível que possa ser mantido para sempre. De outra maneira, maximizar a utilidade de todas as gerações é o mesmo que maximizar a utilidade apenas da geração mais pobre. A conclusão de Solow é que utilizar o critério *maximin* nos modelos utilitarianos não faz grandes reversões aos princípios básicos. Além disso, uma crítica que inviabiliza a troca da abordagem utilitariana por esse tipo de critério diz respeito ao grande e inexplicável estoque de capital que uma economia deve ter para que a pobreza não seja perpetuada, isto é, o critério *maximin* é inteiramente dependente das condições iniciais da economia. Quando a economia já for rica, ela permanecerá rica; se for pobre, permanecerá pobre; fica então difícil, principalmente para países em desenvolvimento, adotar qualquer condição de otimalidade sugerida pela análise de um modelo baseado nesse princípio. Apesar das críticas, o critério é analisado em vários trabalhos posteriores como critério de comparação. A abordagem do critério *maximin* pode ser vista em SOLOW (1974), ENDRESS & ROUMASSET (1994), CASTRO & PEREIRA (1996), e outros. Para uma abordagem e exemplos na estrutura utilitariana veja HOTELLING (1931), DORFMAN (1969), INTRILIGATOR (1971), DASGUPTA & HEAL (1974), STIGLITZ (1974a, 1974b), ROMER (1986), GROSSMAN & HELPMAN (1991), CHIANG (1992), GELDROP & WITHAGEN (1993, 1994), ENDRESS & ROUMASSET (1994), YANG (1995), SOUZA (1997) E FARZIN (1999).

¹ Citado por SOLOW (1974).

A evolução da força de trabalho, muitas vezes tratada como população, é outro ponto de controvérsias. A abordagem-padrão neoclássica para a dinâmica da população (ou força de trabalho) requer que ela tenha uma taxa de crescimento exponencial. Essa troca entre população e força de trabalho, feita em modelos neoclássicos sem muitas explicações, ocorre devido à hipótese básica de pleno emprego. Desde o tempo de Malthus trabalhos empíricos endossavam o crescimento exponencial da população. Entretanto, países desenvolvidos apresentam taxas de crescimento populacional que já não apóiam a hipótese, sendo essa ainda uma boa aproximação para países em desenvolvimento ou para outros que ainda não atingiram seus limites (SOLOW, 1974). Solow afirma ser *ridiculous* essa suposição, pois sabe-se que a população não pode crescer para sempre. Como o autor trata seus modelos para países desenvolvidos, assume uma população dada. DASGUPTA & HEAL (1974a, 1974b) também assumem uma população dada, porém o motivo pelo qual o fazem deve-se à sua crença na necessidade de uma política de controle populacional. O modelo desses autores parte da premissa de que a sociedade por eles tratada já discutiu e aceitou uma taxa de crescimento populacional nula como política ótima. Vários autores – DORFMAN (1969); INTRILIGATOR (1971), STIGLITZ (1974a, 1974b), CHIANG (1992), YANG (1995), SOUZA (1997) E FARZIN (1999) – absorvem a hipótese de crescimento exponencial sem maiores discussões e, de certo, tratam de economias em desenvolvimento. Existe ainda a possibilidade de driblar essas controvérsias simplesmente mascarando o crescimento populacional através de unidades *per capita*, como o fazem ENDRESS & ROUMASSET (1994), ou supondo que a função de produção no caso discutido não é afetada de maneira considerável pela variação desse insumo (ROMER, 1986; GELDROP & WITHAGEN, 1993, 1994).

Quanto à acumulação de capital não há grandes controvérsias. A taxa de depreciação do capital é exponencial – e isto é um dado técnico, não havendo o que discutir, a não ser em casos muito

especiais. Essa suposição é assumida ou não, dependendo da proposta de cada autor. A maioria dos autores, quando não fazem uso da depreciação, deixam bem claro que não estão assumindo depreciação de capital para simplificar o tratamento matemático do modelo: HOTELLING (1931), SOLOW (1974), STIGLITZ (1974a, 1974b), ROMER (1986), GELDROP & WITHAGEN (1993, 1994) E FARZIN (1999). Os demais autores citados, que usam modelos dinâmicos em suas abordagens, assumem a depreciação de capital.

Por fim, a dinâmica de uso do recurso exaurível não tem causado discussões.

6 - ENERGIA, ÁGUA E ECONOMIA

A matriz energética brasileira apresenta uma intensa participação da energia hidráulica na produção e no consumo – 43,5% e 35,6%, respectivamente (BEN, 1998). Essa participação supera a do petróleo em 20,5% e 4,3% respectivamente. Quando o assunto é energia elétrica, 94% desta é produzida por meios hidráulicos e 100% dela é consumida. Diante dos dados nota-se uma grande dependência da água, de modo que a participação da energia hidráulica, que deve ser escrita como uma função da taxa de extração da água, $E_H(A)$, é relevante no total de energia posta à disposição do sistema econômico brasileiro. Ou seja, em alguns casos existe no Brasil o problema de trocar água para produção de bens não-energéticos e água para a produção de energia elétrica. Em outros países, como nos Estados Unidos, não se verifica tal relevância. Lá, a participação do petróleo e da energia hidráulica é, respectivamente, de 38,24% e 4,19% (UNITED STATES, 1997), o que leva a crer que o *tradeoff* não deve constituir um problema relevante. Obviamente, esse problema de trocas só poderá ocorrer antes da barragem de usinas hidrelétricas.

Sabe-se que a energia consumida guarda um relacionamento positivo com o Produto Interno Bruto. Às vezes esse relacionamento é mais intenso, às vezes menos intenso, mas há sempre um relacionamento positivo. É através desse re-

lacionamento que se pode supor que a função de produção tem como um de seus insumos a energia ou a taxa de produção de energia, que é dada pelo setor energético. Esta suposição faz com que o setor energético seja destacado na função de produção, porém a produção em si continua dependente apenas do capital e do trabalho.

O consumo de água para produção de bens não-energéticos também constitui um insumo para produção. Do lado da demanda a água é um recurso de usos múltiplos. Esses usos são competitivos na sua maioria, envolvendo trocas entre as suas utilizações.

Foi com essa preocupação que o artigo 21, inciso XIX, da Constituição de 1988 estabeleceu que é competência da União instituir um sistema nacional de gerenciamento dos recursos hídricos e normas para outorga de direitos de uso, sendo da competência privativa da União legislar sobre as águas (art. 22, IV, da Constituição Federal). Em cumprimento aos ditames constitucionais e preocupado com a escassez de água, o governo federal promulgou a Lei Federal n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a política nacional de recursos hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição, etc., determinando no art. 5º, IV, “a cobrança pelo uso de recursos hídricos”. A água passou a ser considerada um insumo natural limitado, dotado de valor econômico e importante em todo o processo produtivo, devendo ser taxada a utilização das águas de poços, lagos, açudes, rios e subterrâneos.

7 - O MODELO DA INTERAÇÃO ENTRE ENERGIA, ÁGUA E ECONOMIA

7.1 - Introdução

O problema em questão envolve fatores que geralmente são tratados isoladamente: problemática energética (escassez de recursos), fatores econômicos (capital e trabalho) e água produtiva.

Entende-se por água produtiva aquela que é usada para produzir bens não-energéticos e que afeta negativamente a quantidade de energia produzida por usinas geradoras de energia hidráulica. Trata-se, pois, de águas que participam da troca entre águas-insumo produtivo, e águas-geração elétrica. O depósito de água é então diminuído tanto pelo uso da água para produzir bens não-energéticos quanto pelo uso desta para a produção de energia hidrelétrica.

Os três fatores acima apontados envolvem não só o problema do *tradeoff* mencionado, como também problemas de mercado dos energéticos, que se tornaram os determinantes dos hábitos de consumo da sociedade atual (SILVA, 1997).

7.2 – A abordagem do problema

O modelo de crescimento econômico que será apresentado incorpora os aspectos de diversas fontes energéticas, bem como os aspectos da interferência em fontes energéticas da água-insumo produtivo (o que o destaca da literatura corrente) e objetiva estabelecer políticas de planejamento para o problema, oferecendo uma base científica para a discussão objetiva das questões envolvidas, em consonância com os conceitos econômicos estabelecidos.

A formulação é a de um problema de controle ótimo, e a aplicação do Princípio do Máximo, de Pontryagin, leva a conclusões relativas aos preços (tomados como produtividades marginais), aos investimentos, às taxas e aos incentivos associados aos diversos recursos energéticos, que são baseadas numa interação entre o setor energético, a água e a economia como um todo. Nessa formulação percebem-se melhor os aspectos econômicos da energia solar e do *tradeoff* entre água para geração de energia e água para outros usos.

7.3 – Limitações do modelo

Todo modelo é um compromisso entre complexidade e tratamento. Assim, o modelo aqui

exposto contém várias suposições que limitam a extensão de seus resultados ao espaço circunscrito por essas restrições.

A estrutura é utilitariana, com todas as limitações já discutidas anteriormente. Para detalhes, bem como para uma comparação entre a estrutura utilitariana e o princípio *maximin*, veja SOLOW (1974).

As funções de produção são supostamente côncavas com retornos decrescentes de escala, o que pode não representar a verdade em modelos de crescimento econômico de longo prazo. Para detalhes, veja ROMER (1986).

O modelo é determinístico, não tratando as muitas características aleatórias envolvidas num crescimento econômico com recursos limitados, tais como a descoberta de novas reservas, etc. Assim, as variáveis são supostamente conhecidas ou determinadas e previsíveis. Para um tratamento que faz uso de um modelo aleatório de extração, (BATBYAL, 1995).

A economia tratada não suporta exportação de recursos. Dado que a economia em ênfase é a brasileira e é, como mostram os dados do BRASIL (1998), basicamente importadora de energia, este tratamento não parece ser um forte limitador do modelo. Para detalhes de trocas em mercados internacionais, veja YANG (1995), e GELDROP & WITHAGEN (1993).

Por serem as indústrias de extração intensivas em capital e por serem os capitais de extração, na maioria das vezes, não maleáveis, pressupõe-se que não há progresso tecnológico de extração. Assim, as compensações da diminuição dos estoques são feitas através da aplicação de mais insumos básicos, capital e trabalho. Dessa maneira, os recursos são ilimitados. Apesar de parecer uma hipótese forte, dados empíricos mostram, como já discutido, que na verdade houve um aumento de estoque da maioria dos recursos naturais. A suposição é apenas de que essas descobertas podem continuar por algum tempo e que, com o fim dos estoques, será mais difícil

extrair os recursos. Para uma discussão sobre o assunto, veja KRAUTKRAEMER (1998).

Problemas ambientais não são tratados no modelo. A literatura referente a problemas ambientais pelo consumo de recursos fósseis é muito vasta e a existência das várias revistas e jornais especializados nessa área dispensa referências.

Dado que a ênfase é no relacionamento da extração de água para a geração de energia e para a produção de bens, o modelo não inclui efeitos diretos de estoque nem novas descobertas de reservas dos recursos tratados. Isto implica que a regra de Hotelling será válida quando, da mesma forma que em Hotelling, as variáveis de controle forem as taxas de extração dos recursos. Empiricamente, a regra de Hotelling tem falhado (KRAUTKRAEMER, 1998). Entretanto, pode-se incluir características mais complexas e realísticas e obter conclusões empiricamente mais ajustadas. Este trabalho, porém, tem como objetivo estudar analiticamente o relacionamento entre dois insumos de produção que se utilizam da mesma reserva (hídrica). A inclusão dessas outras características poderia tomar o foco das questões que se está examinando no momento. Para alguns tratamentos dessas outras características, veja DAVIS & MORE (1998), e PINDYCK (1978).

O modelo não envolve diretamente variáveis monetárias. Supõem-se equilíbrios de mercado e concorrência perfeita, de forma que as análises monetárias serão feitas utilizando-se os resultados teóricos, comumente usados, de tal suposição. Sendo assim, imperfeições de mercado também não são tratadas no modelo apresentado.

As tecnologias de energias não-convencionais – solar, eólica, nuclear e outras –, não são tratadas como tecnologia de *backstop*. Pressupõe-se que tais tecnologias estão prontas para uso e que podem ser substitutas das tecnologias convencionais. Dentre todas as suposições esta parece ser a mais forte e não-usual, porém isso não deve estar longe de ocorrer. Países como a França, por exemplo, já fazem uso intensivo de usinas nucleares. Para de-

talhes sobre tecnologia de *backstop*, veja NORDHAUS (1973), ENDRESS & ROUMASSET (1994), E KRULCE, JAMES, WILSON (1997).

7.4 – O Modelo

7.4.1 - Hipótese básica do modelo neoclássico de crescimento

Adotam-se as seguintes hipóteses básicas: a) existem recursos ilimitados; b) o capital é um produto excedente acumulado do trabalho; e c) a função de produção é uma função apenas do capital e do trabalho (BURMEISTER, 1980; INTRILIGATOR, 1971; CHIANG, 1992; SOUZA, 1997).

7.4.2 – Identidade da renda

No caso em estudo a identidade da renda será expressa por:

$$F(K_0, L_0, E, A) = I_0 + I_A + I_H + I_R + I_{NR} + s(E_E) + L.c$$

onde:

F = função de produção de bens não-energéticos excluindo a disponibilização de água para fins produtivos.

K_0 = bem de capital para a produção de bens não-energéticos excluindo os capitais relacionados à água produtiva.

L_0 = trabalho para a produção de bens não-energéticos excluindo os trabalhadores relacionados à água produtiva.

I_i = investimento para a acumulação e a reposição do capital K_i .

E = taxa agregada de consumo não-energético dos recursos energéticos.

A = água produtiva, não-energética (que afeta a geração de energia elétrica gerada por usinas hidráulicas e que, quando não usada para geração desta energia, pode produzir bens não-energéticos).

H = recursos hidrelétricos.

R = recursos energéticos renováveis não-restritos (energia solar, eólica, nuclear, etc.).

NR = recursos energéticos não-renováveis restritos (combustíveis fósseis em geral).

E_E = recursos energéticos não-produzidos pela economia em estudo, isto é, recursos energéticos adquiridos no exterior – petróleo, por exemplo, ou mesmo energia elétrica.

$s(E_E)$ = gasto para aquisição do recurso energético E_E .

L = força total de trabalho.

c = consumo *per capita* de bens não-energéticos.

7.4.3 - Identidade de investimento

As identidades de investimento bruto serão dadas por:

$$\frac{dK_i}{dt} = -\mu_i K_i + I_i; i = 0, A, H, R, NR.$$

onde:

K_i = bem de capital para a produção de extração do energético i .

μ_i = taxa de depreciação do capital K_i .

7.4.4 - Tecnologias de produção

Nas tecnologias de produção será utilizada a neutralidade de Hicks para separar o esforço de extração, da tecnologia utilizada para a extração.

A tecnologia de produção do recurso energético i será expressa por:

$$E_i = F_i(K_i, L_i)h_i(D_i), i = H, R, NR$$

onde:

E_i = taxa anual de consumo, ou extração, do recurso energético i .

F_i = função de produção para a extração do recurso energético i .

L_i = trabalho para a produção da extração do energético i .

h_i = função de ponderação que depende do tipo de recurso energético sendo extraído.

D_i = depósitos (reservas naturais) do recurso energético i .

A tecnologia de produção para extração da água, A , para bens não-energéticos, representa os meios de extração e disponibilização da água para a produção de bens não-energéticos. Ela será expressa por:

$$A = F_A(K_A, L_A)h_A(D_A)$$

onde:

A = taxa anual de consumo ou extração de água produtiva, em unidades energéticas.

F_A = função de produção para extração do recurso A .

L_A = trabalho para a produção da extração de A .

h_A = função de ponderação.

D_A = depósitos (reservas naturais) do recurso A .

As funções h geralmente decrescem com D . Isto é válido para todo recurso restrito, limitado. Elas representam a exaustão dos recursos e o fato de que quando as reservas diminuem é necessário alocar mais capital e mais trabalho para extração. Essas funções representam os retornos decrescentes quando minas usadas são exploradas, e uma fonte energética está se esgotando. De uma maneira geral pode-se supor que:

$$\lim_{D_i \rightarrow 0} h_i(D_i) = 0; \quad \lim_{D_i \rightarrow \infty} h_i(D_i) = 1;$$

$$\lim_{D_i \rightarrow 0} \frac{\partial h_i(D_i)}{\partial D_i} = \infty; \quad \lim_{D_i \rightarrow \infty} \frac{\partial h_i(D_i)}{\partial D_i} = 0;$$

(SOUZA, 1997).

Para recursos de reservas infinitas, como energia solar, eólica, nuclear, etc., $h=1$, ou seja, todo esforço é feito pela tecnologia utilizada para extração. O caso hidrelétrico é semelhante a qualquer recurso exaurível. Isto ocorre porque quando há diminuição dos recursos devido a outros

usos, ou seja, quando se diminui a disponibilização de metros cúbicos por segundo de água para geração, teoricamente, segundo a hipótese, é necessário alocar mais capital e mais trabalho para gerar mais energia com menos água disponível.

7.4.5 - Dinâmica do consumo das reservas

A taxa de consumo das reservas D_i do energético i será dada, como usual, por:

$$\frac{dD_i}{dt} = -E_i \quad ; \quad i = R, NR$$

A dinâmica de consumo das reservas de água que são as mesmas, tanto para a energia elétrica gerada por usinas hidráulicas H , quanto para a produção de água produtiva A , $D_H = D_A$ será dada por:

$$\frac{dD_A}{dt} = \frac{dD_H}{dt} = -(E_H + A);$$

7.4.6 - Balanço energético

A taxa agregada de consumo não-energético dos recursos energéticos globais será expressa pela seguinte equação de balanço:

$$E = E_H + E_R + E_{NR} + E_E - A - L.a$$

onde a é o consumo *per capita* de recursos energéticos e $-A$ (menos A) representa o quanto de energia hidráulica seria reduzido da energia total se a água utilizada na geração de energia elétrica por meios hidráulicos fosse utilizada para outros fins.

7.4.7 - Dinâmica de crescimento da força de trabalho (população)

O crescimento da força de trabalho total será descrito em razão de a economia em foco ser de um país em desenvolvimento, pela equação diferencial

$$\frac{dL}{dt} = \beta L$$

onde $b > 0$ é a taxa de crescimento. Naturalmente, a seguinte equação deve ser atendida:

$$L = L_0 + L_H + L_R + L_{NR} + L_A$$

sendo L_0 a força de trabalho alocada à produção de bens não-energéticos, excluídos os bens referentes à água produtiva.

7.4.8 - Função-objetivo

Será utilizada para o funcional objetivo do problema a estrutura utilitariana (utilidade intertemporal) no seguinte formato:

$$J = \int_0^{\infty} e^{-\delta t} Lu(c, \alpha, \beta) dt$$

onde d é a taxa social de desconto, u é a função-utilidade por trabalhador, c é o consumo por trabalhador de bens não-energéticos, a é o consumo por trabalhador de bens energéticos e b é a taxa de crescimento da força total de trabalho.

Sobre a função u será assumido, como usual, que:

É contínua em \hat{A}_+ para todo argumento de u .

Homogênea de 1º grau.

É estritamente côncava para todo argumento de u .

É monotonicamente crescente em \hat{A}_+ , ou seja, estritamente crescente em \hat{A}_+ para todo argumento de u .

É de classe C^2 em \hat{A}_{++} , ou seja, todas as derivadas parciais existem e são contínuas em \hat{A}_{++} em todos os argumentos desta função-utilidade.

$$\text{Os limites } \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\partial u}{\partial c} = +\infty, \lim_{c \rightarrow \infty} \frac{\partial u}{\partial c} = 0,$$

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\partial u}{\partial \alpha} = +\infty, \lim_{\alpha \rightarrow \infty} \frac{\partial u}{\partial \alpha} = 0,$$

$$\lim_{\beta \rightarrow 0} \frac{\partial u}{\partial \beta} = +\infty, \lim_{\beta \rightarrow \infty} \frac{\partial u}{\partial \beta} = 0$$

devem ser válidos. (DASGUPTA & HEAL, 1974a, 1974b; GELDROP & WITHAGEN, 1994; SOUZA, 1997; FARZIN, 1999).

7.4.9 - Colocação do problema

O problema da interação entre energia, água e economia é, portanto, o modelo de crescimento econômico ótimo colocado na seguinte forma:

$$\text{Max } J = \int_0^{\infty} e^{-\delta t} Lu(c, \alpha, \beta) dt \quad (1)$$

sujeito à:

$$F(K_0, L_0, E, A) = I_0 + I_A + I_H + I_R + I_{NR} + s(E_E) + L.c \quad (2)$$

$$\frac{dK_i}{dt} = -\mu_i K_i + I_i; \quad i = 0, A, H, R, NR. \quad (3)$$

$$E = E_H + E_R + E_{NR} + E_E - A - L.a \quad (4)$$

$$E_i = F_i(K_i, L_i) h_i(D_i), \quad i = H, R, NR \quad (5)$$

$$\frac{dD_i}{dt} = -E_i; \quad i = R, NR \quad (6)$$

$$A = F_A(K_A, L_A) h_A(D_A) \quad (7)$$

$$\frac{dD_A}{dt} = \frac{dD_H}{dt} = -(E_H + A); \quad (8)$$

$$D_H = D_A \quad (9)$$

$$\frac{dL}{dt} = \beta L \quad (10)$$

$$L = L_0 + L_H + L_R + L_{NR} + L_A \quad (11)$$

O modelo usa apenas uma função de produção de bens não-energéticos gerais, excluindo a água produtiva, e uma função de produção para utilização da água, sendo as diversas fontes de

energia intercambiáveis na produção dos bens não-energéticos e no consumo direto.

Vê-se claramente pelas equações diferenciáveis do modelo que as variáveis de estado são: K_i ($i = 0, R, NR, H, A$), D_i ($i = R, NR, A$; lembrando que $D_A = D_H$); e L .

Não foram especificadas as variáveis de controle porque elas variarão no decorrer das análises.

7.5 - O Uso do Modelo

As análises e políticas serão feitas e obtidas pelo uso de duas diferentes composições das forças de controle, dependendo do poder de decisão do agente econômico que supostamente está tentando controlar o sistema.

As forças de controle que comporão a primeira análise serão as utilizadas mais frequentemente na literatura: I_i ($i = 0, R, NR, H, A$), E_i ($i = R, NR, H$), A , E_o , a e b .

As variáveis L , L_i ($i = 0, R, NR, H, A$), E e c dependerão do estado e do controle.

Essas forças representam um governo ou um benfeitor social que controla o sistema, seja através de leis ou por serem públicas as empresas de energia. Mais especificamente, é o caso do Brasil com empresas de energia não-privadas.

Na segunda análise utilizar-se-ão as variáveis de controle propostas em SOUZA (1997): I_i ($i = 0, R, NR, H, A$), L_i ($i = R, NR, H, A$), E_o , a , e b .

Nesse caso, as variáveis L , L_o , E_i ($i = R, NR, H$), E , A e c dependerão do estado e do controle.

Essas forças representam um governo ou um benfeitor social que, não tendo mais o controle das taxas de extração dos energéticos, tenta saber que políticas deve seguir se detém o controle dos investimentos e do nível de emprego em cada setor. Mais especificamente, representam as políticas a serem ado-

tadas no caso da privatização das empresas de energia elétrica.

Nas duas análises será usado o Princípio do Máximo, de Pontryagin, para obter as condições necessárias de otimalidade.

Nas duas análises utiliza-se o investimento ao invés do consumo como variável de controle. Sabe-se entretanto que tais utilizações, de uma ou de outra variável, são matematicamente equivalentes, dado que são, na forma agregada, funções complementares à produção. Essa opção é exigida pela divisão do investimento em vários setores (o não-energético, a água e os três energéticos), tornando mais claras as políticas a serem adotadas.

Na primeira análise, as demais variáveis de controle são padrões na literatura, dadas as diferenças de ordem dos modelos.

Na segunda análise não se utilizam as taxas de extração como variáveis de controle. Nesse caso, as principais variáveis são o número de trabalhadores em cada setor e subsetor, a taxa de crescimento da força de trabalho (população) e a taxa de consumo *per capita* de energéticos. Com isto pretende-se obter políticas de emprego, consumo de energia e crescimento populacional.

Para as duas análises o Hamiltoniano do problema será:

$$H = e^{-\delta t} [Lu(c, \alpha, \beta) + \sum_{i=0, R, NR, H, A} q_i (\mu_i K_i + I_i) - \sum_{i=R, NR} p_i E_i - p_A (E_H + A) + q_L \beta L] \quad (12)$$

onde $e^{-\delta t} q_i$, $e^{-\delta t} p_i$, e $e^{-\delta t} q_L$ são as variáveis de co-estado, ou os preços-sombra descontados no tempo. Uma interpretação das variáveis de co-estado aqui envolvidas seria: para as variáveis de rótulo q , excetuando-se q_L , o adicional de utilidade causado pelo aumento de capital em um determinado setor ou subsetor; para as variáveis de rótulo p , o adicional de desutilidade cau-

sado pela diminuição das reservas disponíveis, o preço no local², deve ser observado que a variável de co-estado $e^{-\delta t} p_H$ não existe porque tanto H quanto A fazem uso das reservas de água; q_L , o adicional de utilidade causado pelo aumento de trabalho na economia como um todo. Uma interpretação econômica bastante interessante do Princípio do Máximo pode ser encontrada em DORFMAN (1969) e em CHIANG (1992).

Nas duas análises pressupõe-se que haja uma única solução, sendo esta interior ao domínio das variáveis.

A aplicação das condições necessárias de otimalidade levará a uma série de conclusões a respeito das questões de política energética e hídrica.

7.5.1 - Primeira análise

7.5.1.1 - Condições necessárias e relações de otimalidade

Pela aplicação do princípio do máximo chega-se a várias condições de otimalidade para primeira análise. Abaixo estão transcritas as relações mais relevantes.

$$\frac{\partial F}{\partial E} = \frac{ds}{dE_E} \quad (17); \quad q_L = -\frac{\partial u}{\partial \beta} \quad (19); \quad q = \frac{\partial u}{\partial c} \quad (26);$$

$$\frac{\partial F}{\partial E} = \frac{p}{q} \quad (35); \quad \frac{\partial F}{\partial A} = 2 \frac{\partial F}{\partial E} \quad (36); \quad \frac{\dot{p}}{p} = \delta \quad (37);$$

$$\mu_A = \mu_H = \mu_R = \mu_{RN} = \mu \quad (40); \quad \frac{\dot{q}}{q} = \delta - \mu \quad (41);$$

$$\frac{\partial F}{\partial K_0} = \mu - \mu_o \quad (43);$$

$$\dot{q}_L = (\delta - \beta)q_L + q(c - \frac{\partial F}{\partial L_0}) - p\alpha - u \quad (44);$$

$$p = \frac{\partial u}{\partial \alpha} \quad (45);$$

7.5.1.2 - Resultados: interpretação das relações obtidas

A expressão (37) é a regra de Hotelling, resultado já esperado com taxas de extração como variáveis de controle.

A expressão (41) afirma que a menos da taxa de depreciação o valor marginal do capital deve crescer à taxa de juros. A expressão (40) afirma que os bens de capital dos setores energéticos e da água devem ser homogêneos.

A expressão (26) especifica que o valor de adicionar mais capital ao sistema, ou seja, o valor marginal do capital, deve ser igual à utilidade marginal de consumir bens não-energéticos. Assim, no curso ótimo, o adicional de utilidade de consumir mais bens não-energéticos deve ser igual ao adicional de investir mais em bens de capital.

A expressão (45), analogamente à (26), especifica que o valor de consumir mais reservas do sistema, ou seja, o valor das reservas no local, deve ser igual à utilidade marginal de consumir energéticos. Isto é, no curso ótimo o adicional de satisfação de consumir mais energéticos deve igualar-se ao adicional do máximo social de consumir mais reservas de recursos.

A expressão (19) afirma que, no curso ótimo, a contribuição para o máximo social do trabalho deve igualar-se à insatisfação marginal da taxa de crescimento da força de trabalho. Isto é, o valor de adicionar força de trabalho ao sistema deve ser igual à desutilidade marginal do crescimento dessa força. Em termos unitários, a expressão (19) estabelece qual deve ser o valor de adicionar um trabalhador ao sistema, q_L , sendo este igual à desutilidade causada pela taxa de crescimento da população. Assim, quanto menor a taxa de crescimento da força de trabalho, menor a desutilidade causada pela adição de um trabalhador a mais no sistema econômico.

A expressão (17) afirma que a contribuição dos energéticos à produção de bens de consumo

² Os vários nomes utilizados para referenciar tais variáveis já foram discutidos anteriormente.

não-energéticos, ou seja, o preço doméstico dos energéticos, deve ser igual ao preço de compra dos energéticos importados. Além disso, $\frac{\partial F}{\partial E_i} = \frac{\partial F}{\partial E} = \frac{ds}{dE_E}$ (59). Dado que $\frac{\partial E}{\partial E_i} = 1$. Isto significa que, para estar seguindo o curso ótimo, deve-se ter um único preço para todas as formas de energia primária. Os preços devem ser iguais para todos os energéticos, inclusive os importados.

A expressão (35) tem dois enfoques. Por um lado, ela estabelece que o preço doméstico dos energéticos deve ser igual à taxa de substituição entre bens não-energéticos e energéticos; essa interpretação pode ser melhor visualizada quando a expressão é escrita utilizando-se as igualdades (26) e (45):

$$\frac{\partial F}{\partial E} = \frac{\partial u / \partial \alpha}{\partial u / \partial c} \quad (18)$$

Na sua forma original, a expressão afirma que a substitutibilidade entre bens não-energéticos e energéticos deve ser igual à razão entre o valor dos recursos no local e o valor marginal do capital. Quanto maior o valor das reservas, maior deve ser o preço dos energéticos; e, quanto maior o valor marginal do capital – o quanto o valor máximo social cresce quando capital é adicionado ao sistema –, menor deve ser o preço dos energéticos.

A expressão (36) mostra que a contribuição da água para produção de bens não-energéticos deve ser o dobro da contribuição dos energéticos para a mesma produção. Ou seja, o preço doméstico da água deve ser posto 100% acima do preço dos energéticos. Essa expressão é a única expressão analítica que expressa qual o *tradeoff* ótimo que deve ser estabelecido entre água e energia. Dessa forma, se não houvesse essa dependência energética da água que contribui diretamente na produção e, indiretamente, através da energia hidrelétrica, de certa maneira o preço da água seria independente do preço dos energéticos e a água seria tratada como um bem de capital comum, obviamente devido às apro-

ximações feitas no modelo. Pode-se ainda dizer que a expressão estabelece que existe um custo de oportunidade quando se usa a água para geração de energia elétrica em vez de usá-la de outra forma. Quando se “fabrica” energia elétrica por meios hidráulicos, vende-se um produto por metade do preço do seu valor.

Sendo constantes as taxas de depreciação, a expressão (43) estabelece que a contribuição do capital não-energético na produção desses bens deve ser constante. Ou que o preço real do capital para a produção de bens não-energéticos deve ser constante no curso ótimo. A função de produção deve ser quase linear no capital.

A expressão (44) estabelece qual deve ser o desenvolvimento temporal do valor de adicionar trabalho ao sistema. Sendo as demais variáveis constantes, *ceteris paribus*, quanto maior a utilidade num determinado instante de tempo, quanto maior o consumo energético, quanto maior a taxa de desconto, quanto maior o valor das reservas dos recursos energéticos e da água, quanto maior o salário, $\frac{\partial F}{\partial L_0}$, quanto menor o consu-

mo e quanto menor a taxa de crescimento da força de trabalho – menor deve ser esse valor. Como esse valor é uma desutilidade, pela expressão (19) deve-se tentar diminuir a taxa de crescimento da população, o consumo por trabalhador e a taxa de consumo das reservas. Por outro lado, deve-se tentar aumentar o salário dos trabalhadores, o consumo energético e a taxa de impaciência da sociedade. Essa interpretação está baseada na fixação de todas as variáveis quando apenas uma varia. Quanto a raciocínios práticos, deve-se ter em mente que todas as variáveis estão simultaneamente variando e que se deve levar em conta as interdependências envolvidas. Existe acima o que pode parecer uma contradição em termos: deve-se diminuir a taxa de consumo das reservas e aumentar o consumo energético. Como isto seria possível? Isto só é possível se o energético utilizado para consumo não for um energético escasso. Assim, em termos qualitativos, a sugges-

tão é que sejam utilizados energéticos de fontes ilimitadas – a solar, a eólica ou mesmo a nuclear – para diminuir a desutilidade em questão. Outra suposta contradição seria o caso de, por um lado, diminuir o consumo por trabalhador e, por outro lado, de aumentar o salário. Neste caso, o que a expressão sugere é que haja um balanço entre salário e consumo, de forma que se possa ter aumentos simultâneos de salário e de consumo sem que haja influência na taxa de desenvolvimento dessa desutilidade.

7.5.2 - Segunda análise

7.5.2.1 - Condições necessárias e relações de otimalidade

Pela aplicação do Princípio do Máximo chega-se a várias condições de otimalidade para segunda análise. Abaixo estão transcritas as relações mais relevantes obtidas dessas condições.

$$\frac{\partial F}{\partial E} = \frac{ds}{dE_E} \quad (17); \quad \frac{\partial F}{\partial E} = \frac{\partial u / \partial \alpha}{\partial u / \partial c} \quad (18); \quad q_L = -\frac{\partial u}{\partial \beta} \quad (19);$$

$$q = \frac{\partial u}{\partial c} \quad (26);$$

$$\frac{\partial F / \partial L_0}{h_i(D_i)(\partial F_i / \partial L_i)} = \frac{\partial F}{\partial E} - \frac{p_i}{q} \quad i = R, NR \quad (46);$$

$$\frac{\partial F / \partial L_0}{h_H(D_A)(\partial F_H / \partial L_H)} = \frac{\partial F}{\partial E} - \frac{p_A}{q} \quad (47);$$

$$\frac{\partial F / \partial L_0}{h_A(D_A)(\partial F_A / \partial L_A)} = \frac{\partial F}{\partial A} - \frac{\partial F}{\partial E} - \frac{p_A}{q} \quad (48);$$

$$\frac{\partial F}{\partial A} = 2 \frac{\partial F}{\partial E} + \frac{\partial F}{\partial L_0} \left(\frac{1}{h_A(D_A) \partial F_A / \partial L_A} - \frac{1}{h_H(D_A) \partial F_H / \partial L_H} \right) \quad (49);$$

$$\frac{\partial F}{\partial L_0} = (\mu_H - \mu_A) \frac{TMST_H TMST_A}{TMST_H - TMST_A} \quad (52);$$

$$\frac{\dot{q}}{q} = \delta - \mu_i - \frac{1}{TMST_i} \frac{\partial F}{\partial L_0} \quad (53);$$

onde $TMST_i = \frac{\partial F_i / \partial L_i}{\partial F_i / \partial K_i}$ é a taxa marginal de substituição técnica do setor i , excetuando-se o setor não-energético representado sob o subscrito zero.

$$\frac{\partial F}{\partial L_0} = \frac{(\mu_H - \mu_R) TMST_H TMST_R}{TMST_H - TMST_R} \quad (54);$$

$$\frac{\partial F}{\partial K_0} = \mu_i - \mu_0 + \frac{1}{TMST_i} \frac{\partial F}{\partial L_0} \quad (55);$$

$$\dot{q}_L = (\delta - \beta) q_L + q \left(c - \frac{\partial F}{\partial L_0} \right) - \alpha \frac{\partial u}{\partial \alpha} - u \quad (56);$$

$$\dot{p}_i = \delta p_i - q \frac{\partial F}{\partial L_0} \frac{\partial E_i / \partial D_i}{\partial E_i / \partial L_i} \quad (57);$$

$$\dot{p}_A = \delta p_A - q \frac{\partial F}{\partial L_0} \left(\frac{\partial E_H / \partial D_A}{\partial E_H / \partial L_H} + \frac{\partial A / \partial D_A}{\partial A / \partial L_A} \right) \quad (58);$$

7.5.2.2 - Resultados: interpretação das relações obtidas

Alguns dos resultados apresentados aqui já foram encontrados e discutidos no trabalho de SOUZA (1997). Porém, o modelo deste trabalho incorpora problemas hídricos e retira do modelo original a função *learning by doing* proposta por ARROW (1969) para identificar tecnologias em evolução. Como alguns resultados foram consistentes com a reformulação, algumas vezes utilizam-se as mesmas palavras usadas no trabalho citado. Para isto usam-se aspas.

As relações (17), (19) e (26), por serem as mesmas, têm interpretações idênticas.

A expressão (18) conserva apenas uma das interpretações já feitas na análise I – a da substitutibilidade.

As expressões (46), (47) e (48) sugerem cobrança de taxas para empresas exploradoras de recursos naturais. Isto é válido no curto e médio prazos. Como as indústrias energéticas são em grande parte intensivas em capital e sendo esse capital não-maleável, como já discutido, todo o custo após o início da extração pode ser satisfatoriamente aproximado pelos salários pagos aos trabalhadores. “ $(\partial F/\partial L_0) = w$ é o salário do trabalhador que produz bens gerais. Supondo uma substitutibilidade entre os trabalhadores, esse deve ser também o salário dos outros trabalhadores (L_i). Esses trabalhadores L_i produzem marginalmente $(\partial F_i/\partial L_i)h_i(D_i)$ em termos do recurso energético E_i ”. Então, “a firma produtora do recurso energético E_i (que usa trabalho L_i) poderia cobrar pelo produto um preço dado por $\frac{\partial F/\partial L_0}{h_i(\partial F_i/\partial L_i)}$ ”, pela expressão (46), sendo $\partial F/\partial E$ o preço de mercado. Na verdade, a firma teria um *lucro extra* p_i/q_i . Sabe-se também que $p_i = (\partial V/\partial D_i)$ indica o decréscimo na utilidade total, quando D_i decresce. Tem-se que investir mais para restaurar o valor de V . Isto é feito com q_i , e p_i/q_i seria esse investimento. Quem deveria fazer esse investimento? A firma produtora foi quem, por exemplo, escavacou a mina ou usou terra arável (talvez exaurindo-a), e vendeu o recurso energético com fins lucrativos. Tudo indica que p_i/q_i deve ser uma taxa a ser cobrada com relação à exploração do recurso E_i . No caso de energéticos de fonte ilimitada, “seria o contrário; isto é, p_i/q_i , o *lucro extra*, deveria ficar mesmo com a firma”.

As firmas produtoras de energéticos limitados devem pagar uma taxa para restabelecer o valor do bem-estar social e o nível de energia potencial que foi retirado das minas. Uma maneira de fazer isso é utilizar essas cobranças para financiar energias não-convencionais ilimitadas, restabelecendo o nível de energia do sistema.

A expressão (47) mostra que as firmas produtoras de energia hidrelétrica também devem pagar a taxa de utilização. Já as firmas produtoras

de disponibilização de água deveriam pagar duas taxas, como mostra a expressão (48). Uma delas, devido à redução do recurso; a outra, pela redução da energia do sistema. Quanto maior a produtividade marginal dos energéticos totais, maior a taxa para as firmas de água. Ainda pela expressão (48), o preço da água deve ser suficientemente alto para que dele se possa retirar dois financiamentos: um para repor a energia e outro para repor as reservas (através de investimentos em, por exemplo, gerenciamento de recursos hídricos, ou tecnologias não-convencionais, como dessalinização, etc.). A expressão (49) indica que o preço de mercado da água deve ser duas vezes o preço dos energéticos se os custos de produzir energia hidrelétrica forem iguais aos de se produzir água.

As expressões (52) e (54) mostram que o salário dos trabalhadores deve depender de taxa de depreciação de capitais e de taxas marginais de substituição e que deve ser independente das reservas dos recursos. O capital não deve ser homogêneo com relação à taxa de depreciação. Caso fosse feita a hipótese de capital homogêneo, o salário dos trabalhadores deveria ser nulo durante o curso ótimo – o que faria sentido – mas não teria significado econômico relevante.

A expressão (55) define a produtividade marginal do capital. Quanto maior o salário dos trabalhadores, maior deverá ser a produtividade marginal do capital.

A expressão (53) estabelece que a taxa de crescimento do valor marginal para todo tipo de capital deve crescer com a taxa de juros descontando-se a manutenção (devido à depreciação) e o custo equivalente do trabalho devido à aquisição de mais capital em vez de mais trabalho.

A expressão (56), que exprime como a (44) da primeira análise o desenvolvimento temporal do valor de adicionar trabalho ao sistema estabelece que, *ceteris paribus*, quanto maior a utilidade num determinado instante de tempo, quanto maior o consumo energético, quanto maior a utilidade marginal do consumo energético, quanto

maior a taxa de desconto, quanto maior o salário, $\partial F / \partial L_0$; quanto menor o consumo e quanto menor a taxa de crescimento da força de trabalho – menor deve ser esse valor. Como em (44), esse valor é uma desutilidade; pela expressão (19), deve-se tentar então diminuir a taxa de crescimento da população e o consumo por trabalhador. Por outro lado, deve-se tentar aumentar o salário dos trabalhadores, o consumo energético e a taxa de impaciência da sociedade. O caso de por um lado diminuir o consumo por trabalhador e, por outro, de aumentar o salário, pode ser interpretado e discutido como na primeira análise.

Finalmente, as expressões (57) e (58) estabelecem que a taxa de diminuição das reservas deve ser menor que a taxa de juros para energéticos escassos. A taxa de diminuição das reservas deve diminuir com o aumento dos custos de extração de curto prazo, com o aumento da eficiência da extração e com o valor marginal do capital. Para recursos não-escassos, a taxa de consumo das reservas deve aumentar com a taxa de juros. Os recursos não-escassos devem ser vistos como qualquer outro bem de capital.

8 - CONCLUSÕES GERAIS

A primeira análise impõe a homogeneidade com relação à taxa de depreciação dos bens de capital energéticos para que a economia siga seu curso ótimo. Já na segunda análise isto não é necessário e, se essa imposição fosse exógena, os resultados do modelo falhariam economicamente. Bens de capital homogêneos são uma boa aproximação, mas bens de capital heterogêneos parecem ser uma suposição mais próxima da realidade observável.

A primeira análise também impõe restrições à função de produção de bens não-energéticos; a produtividade marginal do capital não-energético deve ser constante; a função de produção de bens não-energéticos deve ser quase linear no capital. Na segunda análise não há nenhuma restrição, a não ser as preestabelecidas nas hipóteses iniciais, impondo a função de produção de bens não-energéticos. A segunda análise

parece, mais uma vez, se aproximar mais da realidade que a primeira.

Vários trabalhos (KRAUTKRAEMER, 1998; DAVIS & MOORE, 1998) comentam a falta de evidências empíricas que comprovem a regra de Hotelling, pois esta supervaloriza as reservas dos recursos. Isto é, o valor das reservas não cresce com a taxa de juros e sim, menos que ela. Na Segunda análise, a equação (57):

$$\dot{p}_i = \delta p_i - q \frac{\partial F}{\partial L_0} \frac{\partial E_i / \partial D_i}{\partial E_i / \partial L_i}$$

mostra um termo que deve ser subtraído da regra de Hotelling. Porém, só através de testes empíricos pode-se saber se essa nova equação é condizente com a realidade. Como os dados empíricos apontam para uma supervalorização da regra de Hotelling, mesmo não sendo exatamente esta quantidade a ser retirada da tendência, a equação (57) deve ser mais próxima da realidade que a regra de Hotelling pura.

A primeira análise estabelece que o preço de mercado da água deve ser o dobro do preço de mercado dos energéticos. Na segunda análise este preço pode ser maior ou menor que o dobro, dependendo da diferença de custos de curto prazo das empresas de extração de água produtiva e de energia hidrelétrica. Sendo iguais os custos dessas empresas, a conclusão é a mesma que na primeira análise. Deve-se então tentar substituir energia hidrelétrica por outra fonte de energia.

Com o controle das taxas de extração nenhuma política de tarifas é imposta. Quando o agente não tem mais o controle dessas taxas, tarifas devem ser impostas às empresas de extração. Além disso, essas tarifas devem ser usadas para restaurar o nível de reserva perdido. Elas devem ser um investimento em programas de gerenciamento energético e de gerenciamento hídrico.

Nas duas análises os preços dos energéticos devem ser iguais e devem igualar-se à disposição de ceder bens de consumo para obter mais bens energéticos. Os dados do BEN 1998 indicam que os preços dos energéticos primários ca-

minham para um valor único. Desta forma, esta conclusão aproxima ainda mais o modelo, particularmente com relação à segunda análise da realidade econômica do País.

A taxa de crescimento da população deve ser controlada para baixo. Mais uma vez os dados do BRASIL (1998) indicam que a taxa de crescimento da população brasileira tem caído nas últimas décadas. O modelo, particularmente a segunda análise, parece novamente estar de acordo com a realidade brasileira.

Devem ser usados energéticos de fontes ilimitadas para aumentar o consumo energético e diminuir o consumo das reservas. Sugere-se aqui o uso da energia solar para aquecimento d'água como primeiro passo para a substituição parcial da energia hidrelétrica. A sugestão também leva em consideração várias outras vantagens que esta fonte contém.

Maiores detalhes podem ser encontrados em SILVA (1999).

Abstract

The problem of water multiple uses is approached via the formulation of an optimal control problem. The peculiarity in studying water as an exhaustible resource due to its multiple uses lays on the fact that it is used directly as an input for the production of nonenergetic consumption goods, as well as an input for another input (electric energy), which in turn produces nonenergy consumption goods again. One should have a gradual substitution of the energetic source that uses water as its input. The opportunity cost of water decreases with the increase of the energy price and with the substitutability among workers of the electric energy utilities that use water as an input, as well as among the ones of the nonenergy sector. The price of the water should be at least twice that of energy. The extra amount

beyond this value would depend on the relationship between the cost of the companies that extract water for nonenergetic uses and that of the hydroelectric utilities. The companies dedicated to nonenergetic water exploitation should pay two rates, which should already be incorporated in the price of water, and used for different purposes. One of the taxes would be allocated to the entity responsible for the water resources management, while the other would go to the entity responsible for investments in the energy sector. Those are some of the main results.

Key-Words:

Exhaustive Resources; Energy-Use; Water-Use.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- ACCOUNTING for mineral resources: Issues and BEA's initial estimates. **Survey of Current Business**, v.74, n. 4, p. 50-72, 1994.
- ARROW, K. J. The economic implications of learning by doing. **Review of Economic Studies**, v. 29, p. 155-173, 1969.
- BATABYAL, Amitrajeet A. The queuing theoretic approach to groundwater management. **Economic Research Institute Study Paper**, p. 95-14.sept. 1995.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Balanco energético nacional 1998**. Brasília, 1998.
- BURMEISTER, Edwin. **Capital theory and dynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. p.1-211.
- CASTRO, Steve de, PEREIRA, Claudiney M. Crescimento econômico endógeno e recursos naturais exauríveis. In: ENCONTRO

- BRASILEIRO DE ECONOMETRIA, 18, Águas de Lindóia, 1996. **Anais...** . Águas de Lindóia, 1996. v. 1. p. 145-163.
- CHIANG, Alpha C. **Elements of dynamics optimization**. Singapore: McGraw - Hill, 1992. p. 159-313
- CRABBE, Phillippe J. The contribution of L.C. Gray to the economic theory of exhaustible natural resources and Its roots in the history of economic thought. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 3, p. 95-220, sept. 1983
- DASGUPTA, Partha, HEAL, Geoffrey M. The optimal depletion of exhaustible resources: symposium. **The Review of Economic Studies**, p. 3-28, 1974.
- DAVIS, Graham A., MOORE, David J. Valuing mineral reserves when capacity constrains production. **Economics Letters**, v. 60, p. 121-125, 1998.
- DORFMAN, Robert. An economic interpretation of optimal control theory. **The American Economic Review**, v. 59, n. 5, p.817-831, dec. 1969.
- ENDRESS, Lee H., ROUMASSET, James A. Golden rules for sustainable resource management. **The Economic Record**, v. 70, n. 210, p. 267-277. sept.1994.
- FARZIN, Y. H. Optimal saving policy for exhaustible resource economies. **Journal of Development Economics**, v. 58, p. 149-184, 1999.
- GELDROP, Jan H. van, WITHAGEN, Cees A.A.M. General equilibrium in an economy with exhaustible resources and an unbounded horizon. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v.5, n.18, p. 1011-1035, 1994
- _____. General equilibrium and international trade with exhaustible resources, **Journal of International Economics**, v.3/4, n.34, p. 341-357, 1993.
- GRAY, L.C. Rent under the assumptions of exhaustibility. **Quarterly Journal of Economics**, v.28, p. 466-489, 1914.
- GROSSMAN, G.M., HELPMAN, E. Quality ladders in the theory of growth. **Review of Economic Studies**, v. 58, p. 43-61, 1991.
- HOTELLING, Harold. The economics of exhaustible resources. **Journal of Political Economy**, v.39, n. 2, p. 124-142, apr.1931.
- HUNT, E.K., SHERMAN, Howard J. **História do pensamento econômico**. 12. ed. Rio de Janeiro: Vozes, 1994.
- INTRILIGATOR, Michael D. **Mathematical optimization and economic theory**. Englewood cliffs, NJ: Prentice - Hall, 1971.
- IYANAGA, S. (Ed.), KAWADA, Y. (Ed.) Pontrjagin's maximum principle. §88C In: **ENCYCLOPEDIA OF MATHEMATICS**. Cambridge: MITPress, 1980. p. 295-296.
- KRAUTKRAEMER, Jeffrey A. Nonrenewable resource scarcity. **Journal of Economic Literature**, v.36, p. 2065-2107, dec.1998.
- KRULCE, Darrell L., ROUMASSET, James A., WILTON, Tom. Optimal management of renewable and replaceable resource: the case of coastal groundwater. **American Journal of Agricultural Economics**, v.79, p. 1218-1228, nov. 1997
- NORDHAUS, W.D. **The allocation of energy resource**. [S.l.], 1973. (Brookings Papers on Economic Activity, 3).

- PINDYCK, Robert S. The optimal exploration and production of nonrenewable resource. **Journal of Political Economy**, v.86, n. 5, p. 841-861, 1978.
- ROMER, Paul M. Increasing returns and long-run growth. **Journal of Political Economy**, v. 94, n. 5, p. 1002-1037, 1986.
- SALANT, Stephen W. **The economics of natural resource extraction**: a primer for development economists. Washington, 1995. (The World Bank Observer).
- SCJWARTZMAN, David. Solar communism. **Science & Society**, v.60, n. 3, p. 307-331, 1996.
- SHAH, Farhed A., ZILBERMAN, David, CHAKRAVORTY, Ujjayant. Technology adoption in the presence of an exhaustible resource: the case of groundwater extraction. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 77, p. 291-299, may 1995.
- SILVA, A. Stamford da. **O Uso dos recursos energéticos, água e energia solar**: implicações econômicas e decisão através de modelos dinâmicos. Recife, 1999. Tese (Doutorado em Economia) - Universidade Federal de Pernambuco, 1999. Cap. 6 e 8.
- SILVA, Neilton Fideles da. Conservação de energia elétrica no setor residencial: um fator de qualidade. **Revista da ETFRN**, Rio Grande do Norte. Ano 13, 2 v. Set.1997.
- SLADE, Margaret E. Natural resource, population growth, and economic well-being: issues and evidence. In: JOHNSON, Gale (Ed.), LEE, Ronald D. (Ed.). **Population growth and economic development**. Wisconsin: University Wisconsin Press, 1987. p. 331-372.
- SOLOW, R.M. Intergenerational equity and exhaustible resources: symposium. **Review of Economic Studies**, p. 29-45, 1974.
- SOUZA, Fernando Campello de. **Introdução do aquecimento solar na matriz energética**. Recife, 1997. (Projeto de Pesquisa CNPq).
- STIGLITZ, Joseph. Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth: symposium. **Review of Economic Studies**, p. 123-137, 1974 a.
- _____. Growth with exhaustible natural resources: the competitive economy - symposium. **Review of Economic Studies**, p. 139-152, 1974 b.
- UNITED STATES. Department of Energy. **Renewable energy annual**. Washington, DC, 1997. V. 1.
- WORLD RESOURCE INSTITUTE. **World resource 1994-1995**: people and environment. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- YANG, Zili. Optimal exporting of exhaustible resources with endogenous trade revenue: the case of a resource-scarce and capital-short economy. **Resource and Energy Economics**, v. 4, n. 17, p. 379-404, 1995.

Recebido para publicação em 23.AGO.2000.