UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE

DEPARTAMENTO DE ECONOMIA

***RECURSOS NATURAIS E O MERCADO:
TRÊS ENSAIOS***

Richard Lee Hochstetler

Orientador: Prof. Decio Kadota

Tese apresentada ao Departamento
de Economia da FEA-USP como
requisito para a obtenção de título de
Doutor em Economia.

São Paulo

2002

FICHA CATALOGRÁFICA

Hochstetler, Richard Lee

Recursos naturais e o mercado : três ensaios / Richard
Lee Hochstetler. -- São Paulo : FEA/USP, 2002.

158 p.

Tese - Doutorado

Bibliografia

1. Recursos naturais – Aspectos econômicos I. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da USP.

CDD – 338.85

Agradecimentos

Ao longo desse trabalho tive o apoio e auxílio de diversas pessoas e instituições às quais gostaria de expressar a minha apreciação e agradecimento:

- ao professor Décio Kadota, meu orientador;
- aos professores Paulo Picchetti, Francisco Anuatti Neto, Eliezer Martins Diniz, Adilson de Oliveira e Ildo Sauer, componentes das minhas bancas de qualificação e defesa;
- ao Instituto de Pesquisas Econômicas, pelo ambiente de estudo;
- ao CNPq, pela bolsa de estudo;
- à minha esposa Juçara, pelo seu apoio e revisão do texto.

Dedico este trabalho ao meu filho Daniel, espero que ele e seus colegas e os filhos dos seus filhos possam experienciar e apreciar o mundo natural.

Índice

Apresentação	iv
1 O Papel dos Recursos Naturais no Crescimento Econômico	1
1.1 Antecedentes teóricos.....	7
1.2 O modelo	13
1.2.1 As preferências.....	15
1.2.2 Os recursos naturais	15
1.2.3 A tecnologia.....	20
1.2.4 O mercado.....	23
1.3 A dinâmica do modelo	25
1.4 Condições para a sustentabilidade	31
1.4.1 A intensidade relativa dos fatores de produção.....	31
1.4.2 A especificidade da tecnologia.....	35
1.4.3 Restrições decorrentes da necessidade de se manter os serviços ambientais	36
1.5 Intervenção no mercado	37
1.6 Conclusão.....	39
1.7 Referências.....	42
1.8 Apêndice	46
2 Recursos Naturais Heterogêneos e o Mercado.....	51
2.1 O setor elétrico brasileiro	56
2.2 O modelo	61
2.2.1 Otimização do parque gerador termelétrico	64
2.2.2 A otimização do parque gerador hidrelétrico	66
2.2.3 A otimização do parque hidrotérmico	69
2.3 Simulações	74
2.3.1 Hipóteses subjacentes	75
2.3.2 Os resultados.....	77
2.4 A arquitetura de mercado	83

2.4.1	Antecedentes acadêmicos.....	85
2.4.2	Os requisitos básicos que a arquitetura de mercado precisa satisfazer.....	90
2.4.3	Uma proposta	96
2.5	Conclusão.....	107
2.6	Referências.....	110
2.7	Apêndice	115
3	Recursos Naturais e Direitos de Propriedade	119
3.1	A multiplicidade de atributos de recursos naturais: o caso dos recursos hídricos no império romano e na Itália medieval.....	125
3.1.1	Moinhos de água	127
3.1.2	Pesca	128
3.1.3	Navegação e sistemas hidráulicos.....	130
3.1.4	Reflexões.....	132
3.2	A origem autônoma dos recursos naturais: o caso do ciclo da borracha na Amazônia	134
3.2.1	A dotação de fatores de produção	135
3.2.2	A atribuição de direitos de propriedade sobre os recursos naturais	137
3.2.3	A maldição dos recursos	139
3.2.4	Reflexões.....	140
3.3	Um regime de direitos de propriedade: o caso de patentes na indústria de sementes transgênicas	142
3.3.1	Direitos de propriedade estimulam a pesquisa e desenvolvimento	144
3.3.2	Patentes são instrumentos imperfeitos	146
3.3.3	Reflexões.....	154
3.4	Conclusão.....	155
3.5	Referências.....	157

Apresentação

Os recursos naturais representam as dádivas da natureza empregadas no processo produtivo. Eles apresentam as mais variadas formas e usos, tais como as terras utilizadas na agricultura; os terrenos ocupados pelos edifícios, fábricas e estradas; os recursos energéticos utilizados pelas máquinas e veículos; os recursos materiais como minérios e alimentos; e o meio ambiente que nos proporciona serviços ambientais. Não há atividade econômica que não envolva recursos naturais. Os recursos naturais permeiam toda a economia.

Os recursos naturais apresentam algumas características intrínsecas que proporcionam desafios para a coordenação das atividades econômicas via mercado. Nos três ensaios desta tese, as implicações dessas características intrínsecas dos recursos naturais para o mercado são examinadas.

O primeiro ensaio analisa as implicações da origem autônoma dos recursos naturais sobre o crescimento econômico. Dado que os recursos naturais não podem ser produzidos pela humanidade, para empregá-los de forma ótima é necessário considerar o seu custo de oportunidade intertemporal. Por várias razões isto não é possível, cabendo questionar se o surto de crescimento desde a Revolução Industrial é sustentável no longuíssimo prazo. O ensaio também explora qual é a política mais adequada para lidar com esse problema potencial.

O segundo ensaio aborda as implicações da multiplicidade de atributos dos recursos naturais. Os recursos naturais apresentam diferentes características, que permitem o desenvolvimento de várias tecnologias para suprir as demandas humanas. Cada tecnologia apresenta uma estrutura de custos e riscos particular, que requer diferentes formas de comprometimento do mercado. Para que essa diversidade de recursos naturais possa ser empregada de forma ótima é necessário que a arquitetura de mercado proporcione essas diferentes formas de comprometimento de forma

harmônica. Para analisar essa questão examina-se o caso do parque gerador hidrotérmico brasileiro e procura-se determinar uma arquitetura de mercado apropriada.

O terceiro ensaio analisa como a atribuição de direitos de propriedade sobre os recursos naturais afeta o bem-estar social e o desenvolvimento econômico. As características intrínsecas dos recursos naturais acarretam elevados custos de transação, que, conforme o Teorema de Coase, significam que a atribuição de direitos de propriedade acaba por determinar como os recursos naturais são empregados. Três casos são examinados. Os dois primeiros demonstram como as características intrínsecas dos recursos naturais afetam o desenvolvimento econômico e o terceiro examina o regime de patentes como forma de se atribuir os direitos de propriedade sobre os recursos naturais.

1 O Papel dos Recursos Naturais no Crescimento Econômico

A história demonstra que a crescente escassez de recursos naturais é uma preocupação recorrente. Previsões alarmantes dos impactos que a crescente escassez de recursos traria à sociedade são feitas há séculos. Thomas R. Malthus previu, no fim do século XVIII, que uma catastrófica fome inevitavelmente atingiria a sociedade, porque a taxa de crescimento populacional era superior à da produção de alimentos. Um século depois, W. Stanley Jevons previu que as reservas de carvão economicamente exploráveis do Reino Unido estariam esgotadas em poucos anos, o que levaria ao fim da prosperidade britânica. Em 1914, a Secretaria de Minas dos Estados Unidos previu que as reservas de petróleo americanas durariam dez anos. Em 1972 o Clube de Roma publicou o relatório *Limits to Growth*, no qual previa que as reservas mundiais de petróleo, gás natural, prata, estanho, urânio, alumínio, cobre, chumbo e zinco estavam se aproximando da exaustão e que seus preços subiriam drasticamente nos anos seguintes. Em todos os casos as previsões não se confirmaram, e a economia continua a crescer.¹

A expectativa de que a escassez de recursos naturais deveria restringir o crescimento da economia já foi frustrada tantas vezes que o fator recursos naturais deixou de ser um elemento central nos estudos macroeconomicos. Os estudos voltados aos recursos naturais passaram a ser considerados um tópico de estudo especializado de pouca importância fora de setores específicos como os setores extrativistas, o setor agrícola e o setor energético. Um exemplo desse descaso com os recursos naturais é o livro *Economic Growth* de Barro e Sala-i-Martin (1995), um dos livros mais citados de

¹ *The Economist* 20 December 1997, reproduzido em Perrings (1998).

crescimento econômico da atualidade, que nem sequer menciona recursos naturais no texto de suas 539 páginas.²

Nem sempre foi assim. Os economistas clássicos atribuíam aos recursos naturais um papel central na economia. Na economia clássica a produção era descrita como sendo formada de três fatores de produção: trabalho, capital e terra. Cada um desses fatores eram vistos como sendo essenciais à produção, sendo que, se um dos fatores fosse mantido em quantidade fixa, a produção apresentaria rendimentos decrescentes. Sendo o fator terra não-reproduzível, concluía-se que a economia inevitavelmente apresentaria taxas de crescimento econômico decrescentes quando o fator terra fosse completamente empregado. Logo, a economia convergiria para um estado estacionário (crescimento zero), provavelmente mais pobre (possivelmente no nível de subsistência), dependendo do crescimento populacional.³

Na visão dos neoclássicos, a importância do fator terra (recursos naturais) havia sido superestimada pelos economistas clássicos; os elementos mais relevantes na determinação do crescimento econômico eram os fatores reprodutíveis (capital e trabalho) e a inovação tecnológica. O aumento de produtividade devido à acumulação de capital e à inovação tecnológica mais que compensavam a escassez de recursos naturais. Assim, os economistas neoclássicos não se contrapuseram explicitamente à teoria clássica, mas modificaram fundamentalmente os rumos da economia, ao mudar o foco de análise. A pauta de pesquisa passava a ser dominada pelo estudo da acumulação de capital físico e humano, das instituições e da inovação tecnológica. Os recursos naturais foram crescentemente excluídos da análise. Modelos macroeconômicos passaram adotar uma função de produção agregada com somente dois fatores de produção: trabalho e capital.⁴ Dessa maneira, tornava-se possível vislumbrar um crescimento equilibrado, no qual a renda *per capita* cresceria

² Barro e Sala-I-Martin (1995) redimem-se do total desprezo dos recursos naturais ao apresentarem um exercício na página 93, no qual o fator perdido é incluído.

³ Malthus (1803), Ricardo (1817), Mill (1857).

⁴ Randall (1987), capítulo 2, e Rosenberg (1976), pp.229-48, destacam a exclusão dos recursos naturais da função de produção como uma das principais mudanças ocorridas na transição da economia clássica para a neoclássica.

eternamente, a uma taxa constante. Esses modelos correspondiam à experiência e às expectativas da época.⁵

A mudança de atitude com relação aos recursos naturais foi motivada primordialmente por questões de natureza empírica. Décadas de crescimento sem evidências de aumento da escassez de recursos naturais levaram os economistas a rever as suas previsões.⁶ Apesar de desvios temporários, o crescimento econômico ao longo do século XX manteve-se firme, com uma taxa de retorno do capital relativamente estável, enquanto a participação dos recursos naturais na renda decresceu.⁷ Os preços dos recursos naturais mantiveram-se relativamente estáveis ou declinantes na maior parte do período, indicando que uma crescente escassez de recursos naturais não tem sido um problema.⁸

Nos dias de hoje é difícil imaginar a economia sem crescimento. Praticamente todos esperam aumentos de salários ao longo da vida profissional; esperam que no Natal do ano seguinte haverá novos e melhores automóveis, computadores, máquinas fotográficas e eletrodomésticos. Durante a maior parte da história humana, no entanto, essa não era a expectativa. A economia se comportava de forma parecida com a economia que Malthus descreveu em seu livro *An Essay on the Principle of Population*. A população não esperava presenciar uma mudança significativa no seu padrão de vida ao longo de suas vidas. Isso não significa que não houvesse avanço tecnológico; havia sim, mas a uma taxa muito baixa, que proporcionava mudanças imperceptíveis para o cidadão comum. Além disso, os ganhos de produtividade obtidos com a inovação tecnológica tendiam a ser anulados pela queda de produtividade, decorrente da pressão do crescimento populacional sobre a escassa oferta de recursos naturais. Assim, o

⁵ Exemplos dos principais modelos de crescimento desenvolvidos pelos economistas neoclássicos são os de Harrod (1939), Domar (1946), e Solow (1956); em todos eles, os recursos naturais são negligenciados. Nesses modelos um estado estacionário de crescimento perpétuo é admissível. Os modelos de crescimento endógeno propostos mais recentemente, como o de Lucas (1988), Romer (1986 e 1990), Grossman e Helpman (1991) e Aghinion e Howitt (1992) também negligenciam recursos naturais e contemplam a possibilidade de crescimento perpétuo.

⁶ Kaldor (1963) apresenta outros fatos estilizados da economia no século XX que ainda hoje são freqüentemente adotados para a avaliação de modelos de crescimento.

⁷ Veja os estudos empíricos realizados por Denison (1995) e Nordhaus e Tobin (1972) para a economia norte-americana.

⁸ Fisher (1981), Krautkraemer (1998) e Smith (ed.) (1979) realizam uma série de estudos empíricos que indicam que não há evidências de uma tendência de crescimento do preço agregado dos recursos naturais, o que sugere que os recursos naturais não estão se tornando mais escassos.

aumento no custo de recursos naturais mantinha o nível de renda *per capita* da grande maioria da população estagnado, próximo ao nível de subsistência.

No final do século XVIII isso mudou. A partir de então a renda *per capita* cresceu de forma contínua.⁹ Os historiadores atribuem essa mudança à Revolução Industrial. As explicações apresentadas pelos economistas para a Revolução Industrial geralmente destacam as mudanças na estrutura de incentivos que aceleraram o processo de acumulação de capital e inovação tecnológica, e, subseqüentemente, a transição demográfica.¹⁰ Esses são elementos fundamentais na explicação do processo pelo qual a sociedade migrou da economia ‘Malthusiana’ para a economia ‘Solowiana’. Essas explicações não contribuem, entretanto, para o entendimento do papel dos recursos naturais no crescimento econômico.

Os recursos naturais permanecem ausentes do debate. Um dos elementos marcantes da Revolução Industrial foi a introdução da máquina a vapor. Essa máquina é uma evidência do papel exercido pela inovação tecnológica na explicação do crescimento econômico, porém ela também representa uma mudança na relação da humanidade com a natureza, pois com ela a sociedade pode aprofundar o uso de recursos naturais para a produção de força.¹¹ A máquina a vapor permitia a produção de força de forma versátil, controlável e constante. Anteriormente, o emprego de

⁹ Lucas (1996) e Jones (2000) identificam os principais fatos estilizados que caracterizam as mudanças na economia a partir da Revolução Industrial.

¹⁰ Para Komlos (1989), o fator crucial para o crescimento sustentável foi a acumulação de capital num ritmo suficientemente elevado para compensar o crescimento demográfico. Lucas (1996) sustenta essa visão enfatizando o aumento da demanda por capital humano na economia industrial. O capital humano é o único ativo que não pode ser totalmente expropriado pelos poderosos, o que proporcionou um incentivo para as massas começarem a acumular capital. Jones (2000) atribui o crescimento sustentado ao aumento do ritmo de inovação tecnológica, que deve-se a dois fatores: o crescimento populacional, que aumenta o número de idéias, e mudanças no arcabouço institucional, que proporcionaram maiores recompensas aos inovadores.

¹¹ Caldwell (1995) compartilha essa noção de que o emprego da energia na produção é o aspecto mais importante da inovação tecnológica. Ele adota o grau de “comando sobre a energia” como arcabouço para organizar o seu relato da história da tecnologia (p. 12). Cameron (1997) também destaca o emprego extensivo de energia de fonte não-animal (especialmente dos combustíveis fósseis) como um dos elementos chaves que distinguem as inovações tecnológicas antes e após a Revolução Industrial (pp. 114-5, 164-6, 198-202, 331-2). Goldenberg (1998) enfatiza a forte correlação entre o uso de energia e o desenvolvimento econômico, examinando a tendência histórica e comparando diferentes países (pp. 29-55, 115-27). Fouquet e Pearson (1998) examinam a evolução do uso de energia no Reino Unido nos últimos 500 anos, destacando a forte relação com o crescimento econômico e mudanças no comportamento. Beaudreau (1998) também defende que a energia é um dos principais responsáveis pelo crescimento econômico, propõe uma ‘função de produção Newtoniana’ e demonstra, através de estudos econométricos, a importância da energia no século XX.

recursos naturais para produção de força era limitado essencialmente ao uso da força animal e de moinhos de vento e água. A máquina a vapor permitia captar e empregar energia de uma forma totalmente inovadora. Ela dava aos seus operadores controle total do processo de produção. Ao contrário do que ocorria com os moinhos de vento e água, a máquina a vapor não dependia das condições climáticas e podia ser instalada onde fosse mais conveniente. A máquina a vapor não estava sujeita a doenças e não requeria tantos cuidados quanto os animais empregados na produção. Além disso, ela apresentava uma versatilidade que permitia a introdução de máquinas para realizar atividades que antes só podiam ser realizadas manualmente. À medida que novas aplicações para a máquina a vapor iam sendo desenvolvidas, observava-se ganhos de produtividade e um crescimento econômico em ritmo sem precedentes.

A máquina a vapor não só intensificava o uso de recursos naturais na produção, mas também intensificava o uso não renovável dos recursos naturais. A máquina a vapor era movida a lenha, carvão vegetal ou carvão mineral. Diferentemente dos animais ou moinhos, os recursos naturais empregados na máquina a vapor eram consumidos. Nos casos da lenha e do carvão vegetal é possível o uso de forma renovável, desde que haja reflorestamento para recompor o estoque de recursos naturais, mas geralmente não foi isso o que se observou. Com a introdução da máquina a vapor, a sociedade começou a dilapidar o estoque de recursos naturais de forma inusitada.

O uso mais intensivo de recursos naturais, devido ao seu emprego como um combustível para produzir energia, a partir da Revolução Industrial, pode ser uma das peças-chaves para se entender a mudança no padrão de crescimento econômico.¹² É importante destacar que reconhecer o papel dos recursos naturais no crescimento não

¹² Estudos de história econômica apresentam suporte para a idéia de que os recursos naturais foram fatores determinantes na Revolução Industrial e na aceleração do crescimento econômico. O'Brien (1996) argumenta que uma das razões para a industrialização do Reino Unido preceder a da França foi a disponibilidade maior de recursos naturais no Reino Unido. A Peste Negra atingiu o Reino Unido de forma mais acirrada do que na França, elevando a razão de terras cultiváveis e de animais domesticados por habitante, o que permitiu ao Reino Unido obter uma produtividade rural mais elevada, possibilitando maior urbanização e especialização da mão-de-obra. Bardini (1997) identifica a escassez de carvão mineral na Itália como sendo a principal razão para o atraso econômico da Itália na 'Era do Carvão' (século XIX) *vis-à-vis* os principais países da Europa. Ele argumenta que a Itália somente conseguiu alcançar o nível de renda da Europa Ocidental quando a eletricidade foi introduzida, possibilitando o emprego da força hidráulica de forma mais intensiva na produção.

necessariamente contradiz as outras explicações para a Revolução Industrial. Reconhecer o papel dos recursos naturais reforça muitos dos argumentos propostos para explicar a mudança no comportamento dos agentes econômicos: a acumulação do capital físico e humano, a estrutura de incentivos proporcionadas pelas instituições, e a definição clara de direitos de propriedade passam a ter nova importância quando se examina o papel dos recursos naturais. Mais importante, entretanto, é a nova dimensão introduzida no debate com a incorporação dos recursos naturais: a sustentabilidade da economia.

A questão da sustentabilidade já existe há algum tempo e vem recebendo mais atenção em anos recentes. É uma questão polêmica, como exemplificado pelo *Global 2000 Report*¹³ e o seu contraponto, *Resourceful Earth*, de Simon e Kahn. Ambos foram publicados no início da década de oitenta mas apresentam prognósticos e recomendações muito diferentes. O livro do Simon teve uma segunda edição, enquanto o primeiro foi abandonado, o que reflete a atitude geral do período. Por outro lado, os autores do relatório *Limits to Growth* lançaram, em 1992, o livro *Beyond the Limits*, no qual defendem que a experiência obtida com o seu simulador *World3* e os dados recolhidos nos 20 anos entre as duas publicações não invalidam as conclusões contidas no seu primeiro livro, mostrando que as preocupações com a sustentabilidade permanecem.

Em geral, a sustentabilidade da economia diante do estoque limitado de recursos naturais é considerada uma questão importante e pertinente, mas além disso há pouco consenso. Mesmo a definição do que seria uma economia sustentável não é consensual.¹⁴ Uma economia sustentável seria aquela que “sustenta” o nível de consumo, o estoque de recursos naturais ou a capacidade de produção? Uma economia sustentável permite reduções temporárias (do consumo ou do produto) desde que a tendência seja não-decrescente?

A polêmica torna-se ainda mais acentuada quando discute-se a política econômica. Estudiosos do assunto geralmente dividem-se em dois grupos: os

¹³ Barney (ed.) (1982).

¹⁴ O capítulo três do livro-texto de Perman, Ma, McGilvray e Common (1999) discute os diferentes conceitos de sustentabilidade.

pessimistas e os otimistas. Os pessimistas propem a intervenção do Estado no mercado para se evitar o uso indiscriminado de recursos naturais. Essa intervenção poderia ser através de tributos, quotas ou da proibição de certas atividades ou do uso de certos recursos naturais. Os pessimistas enfatizam a importância de se agir com precaução, dada a irreversibilidade de muitas alterações que a humanidade impõe sobre a natureza (extinção de espécies, exaustão de recursos, destruição de ecossistemas, etc.). Os pessimistas também advertem que os efeitos das alterações do meio ambiente causadas pela humanidade podem apresentar descontinuidades, levando a efeitos imprevisíveis e repentinos.

Por outro lado, os otimistas enfatizam que o avanço tecnológico e a acumulação do capital permitem que a sociedade futura tenha melhores condições de lidar com os desafios futuros. Eles enfatizam o limitado conhecimento atual e as incertezas relativas à gravidade da situação, e, como descrito no primeiro parágrafo desse ensaio, previsões catastróficas frustradas não faltam na história. Uma ação precaucionária desnecessária não só afetaria o bem-estar da sociedade atual mas o da futura também, ao reduzir a acumulação de capital e a inovação tecnológica. Além disso, os custos de extração e de prospecção e pesquisa de novos recursos naturais devem aumentar com a crescente escassez de recursos, levando a economia a ajustar-se naturalmente às novas condições. Assim, seria melhor evitar intervenções arbitrárias e permitir que o problema seja solucionado pelo mercado.

Esse ensaio explora a questão da sustentabilidade através de um modelo que incorpora os principais argumentos dos pessimistas (o consumo irreversível de recursos naturais) e dos otimistas (a estrutura de custos de obtenção de recursos naturais convexa e a possibilidade de aumentar a produtividade através de inovação tecnológica). O objetivo é explorar o papel dos recursos naturais na economia e as futuras implicações de sua disponibilidade limitada numa economia de mercado.

1.1 Antecedentes teóricos

Apesar da pouca visibilidade que o fator recursos naturais recebe na corrente principal da teoria econômica, as implicações da disponibilidade limitada de recursos

naturais têm sido examinadas. Nesta seção apresenta-se algumas das contribuições que proporcionaram o ponto de partida para o modelo proposto neste ensaio.

Uma das hipóteses adotadas para a especificação da função de produção agregada proposto neste ensaio é a de que os recursos naturais são essenciais. A definição de “essencial” aqui adotada é a proposta por Dasgupta e Heal (1974). Eles definem os recursos naturais como sendo essenciais se a trajetória de crescimento ótima não admitir a exaustão completa do recurso natural. Essa condição é satisfeita se, e somente se, a produção for nula na ausência de recursos naturais ou se a sua produtividade marginal elevar-se infinitamente à medida que a participação dos recursos naturais na produção aproxima-se de zero (Proposição 5’):

$$F(K,0) = 0$$

$$\lim_{R \rightarrow 0} \frac{dF(K,R)}{dR} = \infty .$$

Dasgupta e Heal examinam em quais circunstâncias os recursos naturais são essenciais numa função de produção de elasticidade de substituição constante (função CES), com dois fatores de produção: capital, K , e recursos naturais não-renováveis, R .

$$F(K,R) = \left[\beta K^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (1-\beta) R^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

ou na forma reduzida:

$$f(x) = F\left(\frac{K}{R}, 1\right)$$

sendo $0 \leq \beta \leq 1$. Para isso, eles examinam propriedades da função de produção para diferentes intervalos da elasticidade de substituição, σ .

Se $\sigma = 1$ (função Cobb-Douglas):

$$F(K,0) = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f'(x) = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \infty$$

Se $0 \leq \sigma < 1$:

$$F(K,0) = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f'(x) = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = (1-\beta)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

Se $1 < \sigma < \infty$:

$$F(K,0) = \beta^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} k$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f'(x) = \beta^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = \infty$$

Isso significa que os recursos naturais são essenciais somente quando a elasticidade de substituição entre os fatores é baixa: $\sigma \leq 1$. Quando a elasticidade de substituição dos fatores é menor que um, $\sigma < 1$, não é possível obter a sustentabilidade quando os recursos naturais são exauríveis (ponto 1.4 do artigo de Dasgupta e Heal). Este ensaio concentra-se portanto no caso de uma função de produção Cobb-Douglas, isto é, no qual a elasticidade de substituição dos fatores é igual a 1.

Dasgupta e Heal também examinam a trajetória ótima de consumo da economia com diferentes especificações. Na primeira especificação considera-se uma função de produção que utiliza capital e serviços prestados por um estoque fixo de um bem ou insumo perfeitamente durável (o que equivale ao uso de um dado estoque de recursos naturais de forma renovável) e na segunda especificação considera-se a trajetória ótima de consumo com uma função de utilidade isoelástica e uma função de produção Cobb-Douglas tendo como insumos capital e recursos naturais exauríveis.¹⁵

Stiglitz (1974a) examina as condições necessárias para que haja a possibilidade de se obter um crescimento equilibrado, considerando a inovação tecnológica, a taxa de desconto intertemporal dos agentes, o crescimento populacional e recursos naturais exauríveis essenciais. Seu modelo adota uma função de produção Cobb-Douglas:

$$F(K,L,R,t) = e^{\lambda t} K^{\alpha_1} L^{\alpha_2} R^{\alpha_3}$$

Os três fatores de produção K , L , e R são, respectivamente, capital, trabalho e recursos naturais exauríveis. A soma dos três parâmetros α_1 , α_2 e α_3 é igual a um. A taxa de

¹⁵ A primeira especificação é expressa pela expressão 1.4 do artigo de Dasgupta e Heal (1974), que apresenta uma trajetória ótima na forma apresentada na figura 2 do artigo; enquanto a segunda especificação é expressa pela expressão 1.6 do artigo e apresenta uma trajetória ótima na forma apresentada na figura 17 do artigo. Destaca-se esses resultados porque eles são muito semelhantes às trajetórias verificadas nas fases 2 e 3 do modelo desenvolvido neste ensaio (apresentados na seção 1.3).

progresso técnico é representada por λ , que supõe-se constante. O tempo é representado por t .

Stiglitz determina que um estado de crescimento equilibrado eterno só é obtido quando a taxa de progresso técnico supera a taxa de crescimento populacional multiplicado pela participação dos recursos na produção:

$$\lambda > n\alpha_3$$

A sua análise reforça a noção tradicional de que o crescimento equilibrado depende de uma corrida entre o progresso tecnológico e a escassez crescente de recursos naturais (e o crescimento populacional). A introdução de recursos naturais exauríveis essenciais na função de produção significa, entretanto, que o nível de renda e a taxa de crescimento da economia dependentem da taxa de poupança. Esse resultado é diferente do obtido pelos tradicionais modelos de progresso técnico exógeno nos quais somente o nível de renda depende da taxa de poupança.

Em anos recentes, a preocupação com a sustentabilidade tem se deslocado da preocupação da escassez de recursos naturais exauríveis para a capacidade limitada de prestação de serviços pelos recursos naturais renováveis. Essa mudança decorre da crescente preocupação com os efeitos climáticos causados pela poluição da atmosfera. A capacidade de absorção dos poluentes pelo meio ambiente pode estar chegando ao seu limite, com consequências incertas para a humanidade. A resenha da literatura proporcionada por Beltratti (1997) mostra essa mudança de enfoque. Beltratti critica a adoção de poucas variáveis de estado e as fortes restrições supostas nos modelos existentes. Essas limitações tornam esses modelos de pouca utilidade para a implementação de políticas ambientais. Ele reconhece que essas restrições são necessárias para possibilitar soluções analíticas, mas sugere que seria melhor desenvolver modelos mais complexos, que possam ser simulados, mesmo que não proporcionem soluções analíticas.

Aghion e Howitt (1999) examinam a questão da sustentabilidade para duas classes de modelos de crescimento endógeno:

- a AKR^v , composta por uma função de produção agregada na qual o capital, K , apresenta retornos constantes e os recursos naturais, R , apresentam retornos decrescentes ($0 < v < 1$); e
- a “Schumpeteriana”, $K^\alpha B^{1-\alpha} L^\beta R^v$, composta por uma função de produção agregada composta de quatro insumos: capital físico, K , capital humano, B , trabalho, L , e recursos naturais, R , com os parâmetros $\alpha+\beta+v=1$ de forma que a soma do capital físico e humano apresentam retornos constantes.

Eles examinam o problema tanto quando a restrição decorre do uso dos recursos naturais de forma exaurível como quando o problema decorre de uma capacidade limitada de absorção de poluentes. Eles identificam as condições necessárias para alcançar a sustentabilidade (que em alguns casos não é obtível ou requer hipóteses fortes sobre os parâmetros). O fato de haver inovação tecnológica não é suficiente para garantir a sustentabilidade. Eles ressaltam a importância de distinguir investimentos “verdes” (a tecnologia sustentável), isto é, aqueles que reduzem o consumo de recursos naturais exauríveis ou reduzem a emissão de poluentes dos demais investimentos (a tecnologia não-sustentável).

Esse ensaio adota o arcabouço proposto por Daly (1997) e Georgescu-Roegen (1971) em que a economia é um subsistema contido num sistema fechado –a única exceção sendo a entrada de um fluxo contínuo de energia de origem solar. Isso implica que, no longo prazo, o consumo de recursos naturais e energéticos não pode superar o nível correspondente ao fluxo de energia solar entrando no sistema a cada momento. No entanto, é possível manter o consumo de recursos naturais superior a esse patamar temporariamente empregando recursos naturais de baixa entropia¹⁶ existentes na Terra. No processo de produção esses recursos de baixa entropia são transformados em recursos de alta entropia, reduzindo o potencial energético futuro da sociedade de forma irreversível, pois não há forma de reduzir o grau de entropia.

¹⁶ Entropia é um termo utilizado na termodinâmica para descrever o nível de desordem de um sistema. Quanto mais elevado for o nível de desordem, menor será o potencial de realização de “trabalho” (força empreendida de forma produtiva) do sistema.

Uma das grandes dificuldades associada ao uso de recursos naturais é a ausência de um denominador comum para a mensuração dos recursos naturais. Os recursos naturais apresentam uma multiplicidade de atributos que impedem uma simples agregação dos recursos naturais. O fórum de discussão sobre o conceito “pegada ambiental” (*ecological footprint*) em Constanza *et alli* (2000) demonstra algumas dessas dificuldades. Mesmo a mensuração dos recursos energéticos, isto é, recursos naturais usados na produção de energia, é complexa, como demonstra Cleveland, Kaufmann e Stern (2000). Tentativas de avaliar a importância dos recursos naturais através da estimação de sua participação na renda também não são satisfatórias segundo Daly (1997), pois os preços dos recursos naturais em geral refletem somente o valor agregado aos recursos naturais no processo de extração ou cultivo dos recursos naturais. Esses desafios de ordem empírica impedem o avanço do entendimento do estado em que a humanidade se encontra com relação à “depreciação do capital natural”.

O uso intertemporal de recursos naturais é uma questão complexa pois, como destaca Howarth e Norgaard (1990), não se trata exclusivamente de uma questão de eficiência econômica, mas também de equidade intertemporal. Portney e Weyant (ed.) (1999) levantam duas razões fundamentais pelas quais a análise intertemporal tradicional, utilizando uma taxa de desconto intertemporal, não é adequada para períodos de longuíssimo prazo (como períodos superiores a um século, por exemplo). Em primeiro lugar, porque há um problema de credibilidade: não se pode, com plena certeza, poupar um recurso para ser utilizado no futuro longínquo, pois não há como se impedir que gerações intermediárias se apropriem da poupança da geração atual.¹⁷ Em segundo lugar, não se sabe o custo de oportunidade do capital no futuro remoto. Assim, a taxa de desconto adequada é incerta.¹⁸

Arrow e Fisher (1974) acrescentam a discussão sobre o uso intertemporal de recursos naturais ao incorporar o efeito de decisões irreversíveis num ambiente de incerteza. O seu simples modelo propõe que os benefícios de uma decisão irreversível devem ser ajustados para baixo, de forma a refletir as perdas de opções futuras que a decisão acarreta, o que é conhecido como o princípio da precaução.

¹⁷ Veja o artigo do Arrow, “Discounting, Morality, and Gaming”, em Portney e Weyant (1999).

¹⁸ Veja o artigo do Weitzman, “ ‘Just Keep Discounting, But...’ ”, em Portney e Weyant (1999).

Em anos recentes vários modelos macroeconômicos passaram a representar a função de produção agregada como sendo formada por duas tecnologias distintas. Esses modelos são interessantes porque introduzem um aspecto estrutural ou multi-setorial. Rubio e Goetz (1998) propoem um modelo de crescimento ótimo no qual os recursos naturais podem ser utilizados de duas formas alternativas: a produção ou a recreação. Em ambos os casos, entretanto, os recursos naturais são tratados como um fator inexaurível.

Huthala (1999) introduz a idéia que há duas tecnologias de produção nas quais os recursos naturais podem ser empregados: a tecnologia convencional e a reciclável. O modelo proporciona um conceito de sustentabilidade a partir do conceito de “equilíbrio de materiais” (*materials balance*). Nesse contexto, a sustentabilidade requer que os estoques de recursos naturais remanescentes e de rejeitos da produção sejam estabilizados.

Hansen e Prescott (1999) adotam duas tecnologias para explicar as mudanças observadas no comportamento do crescimento econômico da economia descrita pelos economistas clássicos até a economia descrita pelos economistas neoclássicos: de Malthus a Solow. No seu modelo a “tecnologia malthusiana” requer o fator terra, o que implica que a economia sofre rendimentos decrescentes quando esta tecnologia é adotada. Já a “tecnologia solowiana” requer somente os fatores reprodutíveis, capital e trabalho, permitindo, portanto, um crescimento ilimitado. O modelo reconcilia a teoria clássica com a neoclássica ao explicar a predominância de uma tecnologia sobre outra em cada período como sendo fruto da produtividade relativa de cada tecnologia, que se altera ao longo do tempo, devido ao progresso tecnológico exógeno.

1.2 O modelo

A questão de sustentabilidade é um problema de longo prazo. Um dos elementos-chaves no exame da sustentabilidade é como são tomadas as decisões com impactos no futuro distante. É largamente reconhecido que efeitos de longuíssimo prazo

recebem pouco peso no processo decisório dos agentes econômicos.¹⁹ Essa miopia pode acarretar decisões equivocadas, mas também é uma necessidade. Considere uma presa qualquer. Se o olfato, visão ou audição desse animal fosse ilimitado, o pobre animal não conseguiria dormir, alimentar-se ou procriar pois a todo instante estaria detectando a presença de um predador nas redondezas e, conseqüentemente, numa perpétua busca por um refúgio. Esse animal somente poderia sobreviver se aprendesse a limitar sua capacidade de percepção às suas imediações. De forma semelhante, os agentes econômicos defrontam-se com racionalidade limitada e precisam direcionar os seus esforços para lidar com os desafios mais urgentes.

Isso não significa que o futuro deve ser ignorado. Os desafios mais urgentes da sociedade podem ser aqueles que irão afligir a sociedade no futuro. O que deseja-se destacar aqui é que a sociedade tradicionalmente tem se preocupado pouco com questões futuras e que isso decorre não tanto da irresponsabilidade quanto da necessidade de concentrar-se nos problemas mais imediatos. Através do modelo aqui desenvolvido explora-se:

- o efeito dessa miopia sobre o bem-estar de longo prazo da sociedade e
- se a sociedade pode confiar nos sinais de preço do mercado, resultantes da otimização intertemporal dos agentes, para lidar com as questões de longuíssimo prazo, ou se uma intervenção é desejável.

Para auxiliar nessa análise são realizadas simulações, o que requer a adoção de funções e parâmetros específicos.

O modelo adotado é de gerações sobrepostas. A população é suposta constante no tempo, não há desemprego e a mão-de-obra é empregada nas diversas atividades econômicas na mesma proporção do capital investido em cada tecnologia, de forma que o modelo pode ser reduzido a uma economia com somente dois fatores de produção: capital e recursos naturais. Supõe-se que os agentes buscam maximizar o seu consumo alocando a sua poupança nas atividades que proporcionam o maior retorno, sem se

¹⁹ Considere o exemplo apresentado em Portney e Weyant (1999). Quanto a sociedade estaria disposta a gastar hoje para prevenir um problema que ameaça destruir o mundo até o ano de 2200? Se o PIB mundial esperado para o 2200 for de oito quadrilhões de dólares (valor alcançado se a economia crescer 3% ao ano), o valor presente, adotando uma taxa de desconto de 7%, seria dez bilhões de dólares. Por essa lógica, tudo que a sociedade atual estaria disposta a gastar hoje para salvar a humanidade de um desastre a ocorrer daqui a 200 anos seria dois dólares por habitante.

preocupar com o efeito de suas decisões sobre as gerações subseqüentes. Assim, esse modelo separa claramente as questões de eficiência intra-geracional das questões de equidade inter-geracional.

1.2.1 As preferências

A função de utilidade dos agentes é côncava. Essa é uma hipótese tradicional, que significa que os agentes procuram suavizar a sua renda ao longo do tempo. Supõe-se que a função utilidade é logarítmica:

$$u_t(c_t) = \log(c_t) \quad (1.1)$$

em que c_t representa o consumo no período t . Cada geração vive dois períodos: trabalha e poupa no primeiro período para financiar a sua aposentadoria no segundo período. Os indivíduos maximizam a sua utilidade ao longo de suas vidas realizando uma otimização intertemporal:

$$\underset{c_t}{\text{Max}} \quad u(c_t) + \frac{u(c_{t+1})}{(1+\theta)} = \ln(c_t) + \frac{\ln[(1+i_t)(y_t - c_t)]}{(1+\theta)} \quad (1.2)$$

em que θ é a taxa de desconto intertemporal, y_t é o produto e i_t é a taxa de retorno no período t . Supõe-se que a taxa de desconto é constante e positiva.

1.2.2 Os recursos naturais

Os economistas clássicos tratavam dos recursos naturais como um fator de produção distinto dos outros insumos de produção porque a sua disponibilidade independe do esforço humano. Recursos naturais são uma dádiva da natureza, sem ônus algum, a não ser seu custo de obtenção. Os recursos naturais não podem ser produzidos pela humanidade.

Os recursos naturais podem ser pensados como uma forma de capital, conhecida na literatura como “capital natural”. Neste modelo o estoque inicial do capital natural é N_0 . O capital natural pode ser mantido ou “depreciado”, mas não pode ser aumentado. Essa restrição incorpora a noção de irreversibilidade associada à extinção de espécies, à destruição de ecossistemas e à exaustão de recursos exauríveis, destacada pelos

pessimistas. É uma hipótese forte, que é compensada de certa forma por outra hipótese forte dos otimistas, relativa à inovação tecnológica, a ser discutida adiante.

A possibilidade de “depreciar” o capital natural é o que torna esse fator especial e problemático. No modelo a depreciação é representada pela redução do estoque de capital natural.²⁰ A depreciação do capital natural permite aumentar o bem-estar da geração corrente, mas às custas de uma herança menor de capital natural para as gerações futuras. Trata-se de uma decisão que não pode ser adequadamente tratada pelo mercado pois a outra parte da transação, as gerações futuras, ainda não existem para participar da transação. Assim, a decisão de depreciação do capital natural sofre de um problema sério de assimetria de informação e de representação.

Poderia-se argumentar que a otimização intertemporal do uso dos recursos naturais realizado por cada geração ao longo de suas vidas internalizaria esse problema. Dado que a disponibilidade do capital natural é finita, e que o capital natural não pode ser produzido, esperar-se-ia que o preço dos recursos naturais fosse igual ao seu custo de oportunidade. O preço dos recursos naturais deveria aumentar à medida que esses se tornassem mais escassos. Os agentes econômicos deveriam, portanto, fazer uma arbitragem intertemporal, comprando recursos naturais no presente para revendê-los no futuro a um preço maior. Em equilíbrio a rentabilidade de reter recursos naturais para o futuro apresentaria a mesma taxa de retorno de qualquer outro investimento. Infelizmente, essa arbitragem intertemporal é pouco efetiva para se determinar o preço dos recursos naturais, em função do problema de recursos comuns, externalidades e incertezas. Muitos recursos naturais são não-excludentes, tornando impossível a arbitragem por parte de agentes econômicos, agindo individualmente. Muitos recursos apresentam externalidades e outras propriedades específicas, que dificultam a definição de direitos de propriedade e a definição de preços, tornando a sua comercialização via mercado difícil ou impossível.²¹ Há também muitas incertezas envolvidas nessa arbitragem, dentre as quais as projeções de demanda futura pelo recurso natural, o rumo

²⁰ A depreciação do capital natural também poderia tomar a forma de uma queda na qualidade dos recursos naturais, mas no modelo opta-se por tratar a depreciação somente na dimensão quantitativa.

²¹ Brown (2000) apresenta uma resenha da literatura econômica relativa ao gerenciamento e uso dos recursos naturais renováveis e identifica características dos recursos naturais que tornam problemática a sua comercialização e valorização via mercado.

e ritmo do progresso técnico e o desconhecimento da disponibilidade total de recursos naturais.

Neste modelo supõe-se que esses problemas inviabilizam qualquer tentativa de determinação de preços de recursos naturais a partir do custo de oportunidade intertemporal. O preço dos recursos naturais é definido, portanto, exclusivamente pelo seu custo de obtenção. Esse custo de obtenção é formado por dois componentes: o custo de cultivo ou extração e o custo de descoberta.

Os recursos naturais podem ser utilizados como insumos de produção de forma sustentável ou insustentável. A forma sustentável utiliza os recursos naturais de modo que não reduz o estoque de capital natural, seja cultivando ou extraindo o recurso natural de forma que permite sua regeneração natural, seja através da reciclagem ou reutilização. A forma não sustentável implica uma depreciação do capital natural. A forma insustentável apresenta uma vantagem: ela permite utilizar cada unidade de recurso natural de modo mais intensivo, obtendo mais “insumo” por unidade de recurso natural do que a forma sustentável.

Esse modelo supõe que há um estoque limitado de recursos naturais, mas esse limite não é conhecido pelos agentes. Num dado momento t o estoque de recursos naturais é $N_t + R_t$, mas os agentes econômicos conhecem somente os recursos naturais descobertos, R_t . N_t representa o estoque de capital natural ainda desconhecido. Para “descobrir” recursos naturais ainda desconhecidos os agentes econômicos precisam investir em pesquisa e prospecção, p_{Rt} . “Descobrir” recursos naturais tem um sentido especial nesse ensaio, podendo significar:

- a descoberta de novas reservas,
- inovações tecnológicas que possibilitam a extração de reservas de recursos naturais antes economicamente inviáveis,
- ganhos de eficiência no uso dos recursos naturais como insumo de produção²² ou
- a descoberta de novos usos para recursos naturais antes considerados inúteis.

²² Esse tipo de ganho de eficiência difere da inovação tecnológica: nesse caso somente os recursos naturais passam a ser empregados mais eficientemente, enquanto a inovação tecnológica aumenta a produtividade de todos os fatores de produção.

Para os agentes econômicos desse modelo o capital natural é o estoque de recursos naturais conhecidos e úteis como insumo de produção. Assim, o uso não sustentável de recursos naturais, r_{wt} , e a pesquisa e prospecção de recursos naturais, p_{Rt} , afetam o estoque de recursos naturais desconhecidos e conhecidos, conforme apresentado nas equações 1.3 e 1.4, respectivamente:

$$\Delta N_t = -p_{Rt} \quad (1.3)$$

$$\Delta R_t = p_{Rt} - r_{wt} \quad (1.4)$$

Prospecção e pesquisa de recursos naturais

A prospecção e pesquisa de recursos naturais é uma atividade especulativa. Ela pode ser representada como uma loteria na qual cada unidade de esforço gasto em prospecção e pesquisa de recursos naturais tem a chance de aumentar as reservas conhecidas em uma unidade, com probabilidade π_R de sucesso e uma probabilidade de fracasso de $(1 - \pi_R)$:

$$\pi_R(1) + (1 - \pi_R)(0), \quad \text{com } \pi_R \in (0,1). \quad (1.5)$$

em que $\pi_R = \left(\frac{N_t}{N_0}\right)^\eta$, com $\eta > 0$. Os agentes desconhecem a função que determina a probabilidade da loteria π_R ; eles conhecem somente a probabilidade de sucesso atual. O custo de cada unidade de esforço de pesquisa e exploração de recursos naturais é κ_R . O custo esperado de se expandir as reservas conhecidas, R_t , em p_{Rt} unidades através da prospecção e pesquisa de recursos naturais é:

$$C_R(p_{Rt}) = \kappa_R \int_{p_R=0}^{p_{Rt}} \left(\frac{N_0}{N_t - p_R} \right)^\eta dp_R \quad (1.6)$$

Essas condições resultam numa estrutura de custos de prospecção e pesquisa convexa. Quanto maior for o parâmetro η , maior será a convexidade, podendo tal estrutura apresentar um custo de pesquisa e prospecção quase constante por um longo período e depois rapidamente ascendente quando N_t aproximar-se de zero. A figura 1.1 mostra a progressão do custo de prospecção e pesquisa à medida que o capital natural

desconhecido, N_t , é reduzido de cem mil para cinco mil, supondo que $N_0 = 195.000$, $\eta = 2$ e $\kappa_R = 0,1$. Como pode-se observar, o custo de descoberta de recursos naturais mantém-se num nível muito baixo por grande parte do intervalo e eleva-se de forma dramática ao aproxima-se do esgotamento das reservas desconhecidas.

Figura 1.1: Custo de prospecção e pesquisa de recursos naturais dado o estoque de recursos naturais remanescentes

Todos os recursos naturais empregados como insumo na função de produção ao longo do período t , acarretam um custo de cultivo ou de extração, ϕ , que é constante. Somente recursos já empregados de forma sustentável podem ser empregados sem acarretar custos de prospecção e pesquisa. O custo de obtenção de recursos naturais esperado é, portanto:

$$C_r(r_t) = \begin{cases} \phi r_t, & \text{para } r_t \leq R_t \\ \phi r_t + \int_{p_R=0}^{r_t-R_t} \kappa_R \left(\frac{N_0}{N_t - p_R} \right)^\eta, & \text{para } r_t > R_t \end{cases} \quad (1.7)$$

Os recursos naturais são úteis para a sociedade não só como insumo de produção, mas também pelos serviços prestados pelo estoque de recursos naturais. O estoque de recursos naturais presta uma série de serviços denominados, na literatura, “serviços essenciais de sustentação da vida”. Essa prestação de serviços ocorre naturalmente, não envolvendo qualquer esforço humano. Exemplos desses serviços são a produção de oxigênio pela fotossíntese, o ciclo das águas, a estabilização do clima, a absorção e dispersão de poluentes, o bloqueio de radiação nociva ao ser humano pela camada de ozônio, etc. Esses serviços são bens públicos puros (não-excludentes e não-

rivais). Para que esses serviços sejam prestados de forma eficaz, entretanto, é necessário manter um estoque mínimo de recursos naturais.²³

O estoque mínimo de reservas de recursos naturais necessário para manter o suprimento de serviços essenciais de sustentação da vida é $\bar{N}$. Supõe-se que os agentes sabem que o limite existe, mas não sabem o patamar desse limite. Esse patamar somente torna-se evidente quando as reservas de recursos naturais remanescentes alcançam esse patamar, momento a partir do qual o estoque precisa ser mantido no mesmo nível eternamente. Essa restrição corresponde a uma descontinuidade nos custos de prospecção e descoberta de novos recursos naturais. Essa restrição será considerada em algumas das simulações somente para ilustrar o seu efeito sobre a economia de mercado.

A literatura econômica geralmente trata os recursos naturais dividindo-os em duas classes: recursos renováveis e recursos exauríveis.²⁴ Neste modelo opta-se por não dividir os recursos naturais nessas duas categorias porque reconhece-se que há uma substitutibilidade relativamente alta entre essas duas classes de recursos naturais no seu uso final. Além disso, os recursos normalmente classificados como exauríveis podem ser renováveis na medida que são reutilizados ou reciclados, assim como recursos renováveis podem ser exauridos (e, eventualmente, levados a extinção) se consumidos a uma taxa superior à sua taxa de regeneração. A diferenciação relevante é a de como os recursos naturais são utilizados, ou seja, a diferenciação relevante não é entre os recursos naturais e sim a tecnologia empregada.

1.2.3 A tecnologia

As duas formas de se utilizar os recursos naturais podem ser representadas através de duas tecnologias. A forma sustentável de empregar os recursos naturais é denominada **tecnologia malthusiana**, f_m , enquanto a forma mais intensiva, porém insustentável, de empregar os recursos naturais é denominada **tecnologia wattiana**, f_w . A tecnologia wattiana é insustentável porque ela consome os recursos naturais

²³ Perman, Ma, McGilvray e Common (1999) e Costanza (ed.) (1991).

²⁴ Carlson, Zilberman e Miranowski (1993); Fisher (1981); Kneese e Sweeney (1995); Perman, Ma, McGilvray e Barbier (1989); e Randall (1987) classificam os recursos naturais como exauríveis e renováveis.

empregados, mas seu aproveitamento maior dos recursos naturais permite aumentar a produtividade.

Ambas as tecnologias utilizam dois fatores de produção: recursos naturais e capital físico, k . O capital deprecia-se completamente ao longo de cada período (i.e. meia geração), de forma que o capital não proporciona uma fonte de rigidez para a economia se adaptar às novas condições de fronteira por cada geração. A função de produção wattiana e malthusiana são descritas por funções Cobb-Douglas:

$$f_w = A_t k_{wt}^\alpha (\rho r_{wt})^{1-\alpha} \quad (1.8)$$

$$f_m = B_t k_{mt}^\beta r_{mt}^{1-\beta} \quad (1.9)$$

Os parâmetros α e $\beta \in (0,1)$ e $\rho > 1$. Os recursos naturais utilizados na tecnologia wattiana rendem ρ vezes mais do que na tecnologia malthusiana. A variável r_{mt} representa o estoque de recursos naturais empregados ao longo de todo o período t , enquanto a variável r_{wt} representa o fluxo acumulado de recursos naturais consumidos pela tecnologia wattiana ao longo do período t . As variáveis A_t e B_t representam o estoque de conhecimento técnico e capital humano relativo a cada tecnologia. O conhecimento técnico e capital humano podem ser incrementados ao longo do tempo com pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Neste modelo supõe-se que a sociedade conhecia, inicialmente, somente a tecnologia malthusiana e que a tecnologia wattiana é descoberta posteriormente. O momento da descoberta da tecnologia wattiana é denominada de Revolução Industrial. No modelo, a Revolução Industrial ocorre no período $t=50$ (arbitrariamente escolhido) e consiste na introdução, de forma exógena, da função de produção wattiana como uma alternativa de investimento.²⁵

²⁵ Seria interessante explorar outras estruturas para o modelo que levariam à introdução gradual da tecnologia wattiana à medida que as condições da economia se alterassem. Algo semelhante ao que ocorre no modelo de Hansen e Prescott (1999), no qual as duas tecnologias sempre existiram, mas a produtividade relativa das duas tecnologias se altera à medida que se acumula o conhecimento técnico, o que leva a uma migração dos investimentos de uma tecnologia à outra.

Pesquisa e desenvolvimento tecnológico

Os esforços empreendidos em pesquisa e desenvolvimento das tecnologias wattiana e malthusiana p_{wt} e p_{mt} , respectivamente, podem ser descritos como uma loteria com a probabilidade de sucesso, π_f , e probabilidade de fracasso $(1-\pi_f)$ de se aumentar a produtividade da tecnologia em uma unidade:

$$\pi_f(1) + (1-\pi_f)(0) \quad \text{para } \pi_f \in (0,1). \quad (1.10)$$

Pode-se comprar qualquer fração de loterias. Tomando a postura dos otimistas supõe-se que a inovação tecnológica apresenta rendimentos constantes ao longo do tempo. A pesquisa e desenvolvimento leva tempo, entretanto, e a intensificação dos esforços empreendidos em pesquisa e desenvolvimento num determinado momento apresenta rendimentos decrescentes:

$$\Delta A_t = (p_{wt} + \tau p_{mt})^\psi \pi_f \quad (1.11)$$

$$\Delta B_t = (\tau p_{wt} + p_{mt})^\psi \pi_f \quad (1.12)$$

Os rendimentos decrescentes decorrem do fato de que o parâmetro $\psi \in (0, 1)$. Note o parâmetro τ nas equações acima. O τ indica o grau de especificidade da tecnologia. Se a pesquisa e desenvolvimento for genérica, beneficiando as duas tecnologias igualmente, τ será igual a 1. Por outro lado, se as tecnologias forem radicalmente diferentes, de forma que a pesquisa e desenvolvimento de uma tecnologia não proporcione nenhum benefício para a outra, então τ será igual a 0.

Figura 1.2: Rendimentos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico num período

A figura 1.2 demonstra os rendimentos decrescentes dos dispêndios em pesquisa e desenvolvimento num determinado período, supondo $\pi_f = 0,02$ e $\psi = 0,1$.

1.2.4 O mercado

Na economia de mercado cada agente busca maximizar a sua utilidade através de sua decisão de quanto consumir ou poupar no primeiro período, dada a sua taxa de desconto, θ , a taxa de juros da economia, i_t , e a sua função de utilidade, $\ln(c_t)$. A taxa de juros é a produtividade marginal da economia. Como há várias oportunidades de investimento nessa economia, a taxa de juros resulta de um equilíbrio geral no qual há a equalização das produtividades marginais de cada tipo de investimento. Essa maximização resulta na função objetiva expressa pela equação 1.13a, sujeita à restrição orçamentária (1.13b), as condições iniciais (1.13d) e as definições apresentadas anteriormente (1.13c, e, f, g, h, i, j, k, l, m).

$$\sum_{t=1}^{\infty} \text{Max}_{c_t} \left\{ \ln(c_t) + \frac{\ln[(1+i_t)(y_t - c_t)]}{1+\theta} \right\} \quad (1.13a)$$

$$\text{s.a.} \quad (k_{wt} + k_{mt}) + \phi(r_{wt} + r_{mt}) + \kappa_R \int_{p_R=0}^{p_{Rt}} \left(\frac{N_0}{N_t - p_R} \right)^{\eta} dp_R + p_{wt} + p_{mt} \leq y_{t-1} - c_{t-1} \quad (1.13b)$$

$$y_t = A_t k_{wt}^{\alpha} (\rho r_{wt})^{1-\alpha} + B_{mt} k_{mt}^{\beta} r_{mt}^{1-\beta} \quad (1.13c)$$

$$y_0 = B_0 k_{m0}^{\beta} r_{m0}^{1-\beta} \quad (1.13d)$$

$$A_t = A_0 + \pi_f \sum_{s=1}^t (p_{ws} + \tau p_{ms})^{\psi} \quad (1.13e)$$

$$B_t = B_0 + \pi_f \sum_{s=1}^t (\tau p_{ws} + p_{ms})^{\psi} \quad (1.13f)$$

$$R_t = R_0 + \sum_{s=0}^t (p_{Rs} - r_{ws}) \quad (1.13g)$$

$$r_{wt} + r_{mt} \leq R_t \quad (1.13h)$$

$$N_t = N_0 - \sum_{s=0}^t p_{Rs} \quad (1.13i)$$

$$p_{Rt} \leq N_t \quad (1.13j)$$

$$N_t \geq \bar{N} \quad (1.13k)$$

$$c_t \leq y_t \quad (1.13l)$$

$$p_{Rt} = \text{Max}[0, R_t - r_{wt} - r_{mt}] \quad (1.13m)$$

Há seis oportunidades de investimento distintas: instalação de capital wattiano ou malthusiano, obtenção de recursos naturais para a produção com a tecnologia wattiana ou malthusiana, e pesquisa e desenvolvimento tecnológico orientado para o

aprimoramento da tecnologia wattiana ou malthusiana. O retorno marginal de cada investimento é:

$$k_{wt}:\quad \alpha A_t k_{wt}^{\alpha-1} (\rho r_{wt})^{1-\alpha} \quad (1.14a)$$

$$k_{mt}:\quad \beta B_{mt} k_{mt}^{\beta-1} r_{mt}^{1-\beta} \quad (1.14b)$$

$$r_{wt}:\quad (1-\alpha)\rho A_t k_{wt}^{\alpha} (\rho r_{wt})^{-\alpha} - \phi - \kappa_R \eta \left(\frac{N_0}{N_t - p_{Rt}} \right)^{\eta-1} \frac{N_0}{(N_t - p_{Rt})^2} \quad (1.14c)$$

$$r_{mt}:\quad (1-\beta)B_t k_{mt}^{\beta} r_{mt}^{-\beta} - \phi - \left[\kappa_R \eta \left(\frac{N_0}{N_t - p_{Rt}} \right)^{\eta-1} \frac{N_0}{(N_t - p_{Rt})^2} \right] \quad (1.14d)$$

$$p_{wt}:\quad \pi_f \psi p_{wt}^{\psi-1} k_{wt}^{\alpha} (\rho r_{wt})^{1-\alpha} + \pi_f \psi (\tau p_{wt})^{\psi-1} k_{mt}^{\beta} r_{mt}^{1-\beta} \quad (1.14e)$$

$$p_{mt}:\quad \pi_f \psi (\tau p_{mt})^{\psi-1} k_{wt}^{\alpha} (\rho r_{wt})^{1-\alpha} + \pi_f \psi p_{mt}^{\psi-1} k_{mt}^{\beta} r_{mt}^{1-\beta} \quad (1.14f)$$

Como a tecnologia é Cobb-Douglas, incrementos proporcionais de capital e recursos naturais apresentam retornos constantes, e retornos decrescentes para incrementos em um dos fatores de produção. Como o custo de obtenção dos recursos naturais altera-se a medida que o estoque de recursos naturais desconhecidos é reduzido, a proporção ótima dos fatores de produção é alterada sempre que a tecnologia wattiana é empregada (reduzindo-se a proporção de recursos naturais).

Como os recursos naturais utilizados na tecnologia wattiana são consumidos no processo de produção, em cada período novos recursos naturais precisam ser descobertos através de investimentos em prospecção e pesquisa para fornecer recursos naturais para a operação da tecnologia wattiana. A tecnologia malthusiana, por outro lado, emprega o recurso natural sem consumi-la. Assim, os gastos de obtenção de recursos naturais nessa tecnologia se limitam aos custos de extração ou cultivo, e só acarretam gastos em prospecção e pesquisa quando a quantidade empregada é expandida além do estoque de recursos naturais já conhecidos. Isso implica que a parte em colchetes na equação 1.14d somente aplica-se quando $r_{mt} > R_t$. Implícito nessa abordagem está a presunção de que os recursos naturais só podem ser empregados na tecnologia para a qual foram originalmente obtidos (descobertos).

As equações 1.14e e 1.14f revelam um aspecto interessante com respeito aos investimentos em inovação tecnológica. A produtividade marginal dos investimentos

em inovação tecnológica apresenta um elemento de escala: quanto maior for a quantidade de capital e de recursos naturais empregados na determinada tecnologia, maior será a produtividade dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento dessa tecnologia. Isso implica que a maior parte dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico será direcionada à tecnologia dominante. Significa, também, que o dispêndio em pesquisa e desenvolvimento tecnológico tende a aumentar à medida que a economia cresce.²⁶

A multiplicidade de opções de investimento torna a obtenção de uma solução analítica impraticável. O modelo contempla seis variáveis de controle, quatro variáveis de estado e dez parâmetros, o que tornaria uma solução analítica muito complexa e pouco elucidativa. Além disso, o que é de maior interesse nesse ensaio é a trajetória da fase transitória iniciada com a Revolução Industrial. Essa trajetória é circunstrita por várias equações, o que também inviabiliza uma análise analítica. Assim, optou-se por estudar as implicações deste modelo através de simulações.

1.3 A dinâmica do modelo

Dependendo dos parâmetros e condições iniciais adotadas, esse modelo pode apresentar trajetórias de crescimento (positivo ou negativo) diferentes. Para auxiliar na exploração dos fatores determinantes da trajetória de crescimento produzida por esse modelo utilizam-se simulações. A rotina utilizada nesse ensaio, apresentada no apêndice (seção 1.8), não permite investimentos em incrementos infinitesimais. Pode-se encarar as simulações como sendo o modelo apresentado com uma restrição adicional, a de que todas as alternativas de investimento requerem um investimento mínimo igual ao incremento mínimo permitido na rotina utilizada nas simulações. É importante ressaltar que as simulações são realizadas trabalhando com o valor esperado das variáveis estocásticas associadas à pesquisa e prospecção e à pesquisa e desenvolvimento.

²⁶ A idéia de que esforços dispendidos em inovação tecnológica apresentam retornos decrescentes num dado momento do tempo, mas retornos crescentes ao longo do tempo devido ao aumento dos fatores de produção empregados, é adotada por Jones (2000).

Para iniciar examina-se a trajetória de crescimento de uma economia com os parâmetros e condições iniciais apresentados na tabela 1.1. Esses parâmetros e condições iniciais foram escolhidos porque eles proporcionam uma trajetória de crescimento que ilustra bem os diferentes componentes que determinam o comportamento da economia.

Tabela 1.1: Parâmetros e condições iniciais

PARÂMETROS			
α	0,65	ϕ	0,025
β	0,55	κ_R	0,015
ρ	10	η	2
τ	1	π_f	0,02
θ	5,07	ψ	0,2
CONDIÇÕES INICIAIS			
A_0	2	r_{m0}	200
B_0	2	k_{m0}	10
N_0	19800	R_0	200

Essa simulação também é interessante porque representa uma situação intermediária dentre as amplas possibilidades que o modelo admite, como discutido na próxima seção. A figura 1.3 apresenta a trajetória de crescimento do log natural do produto dessa economia. Essa simulação mostra que existe a possibilidade de que a economia possa ajustar-se naturalmente para a trajetória de crescimento sustentável (isto é, crescimento positivo e perpétuo), sem a necessidade de uma intervenção no mercado. Mesmo assim, uma intervenção poderia ser desejável, porque essa economia sofreria uma queda drástica no produto antes de alcançar a trajetória de crescimento sustentável.

Figura 1.3: Crescimento do produto ao longo do tempo

Essa economia apresenta comportamentos bastante diferentes ao longo de sua trajetória. Essa mudança no comportamento do crescimento econômico decorre de três causas: a substituição da tecnologia dominante, a crescente escassez dos recursos naturais e a inovação tecnológica. Pode-se dividir essa trajetória em três fases diferentes que examina-se a seguir.

A primeira fase

A primeira fase corresponde ao segmento destacado com o fundo branco, no lado esquerdo da figura 1.3(a). Essa fase inicia-se no período $t = 0$ e termina no período $t = 50$, ou seja é o intervalo de tempo no qual somente a tecnologia malthusiana é empregada. Nesse período observa-se uma economia num estado estacionário sem crescimento (ou um crescimento imperceptível).²⁷

Figura 1.3(a): Fase 1

No início da primeira fase (não mostrado na figura) a economia cresce empregando cada vez mais recursos naturais e capital. Eventualmente, porém, o custo crescente de prospecção e pesquisa de novos recursos naturais inviabiliza a expansão de recursos naturais e a economia passa a apresentar taxas de retorno decrescentes; a taxa de poupança cai, reduzindo o crescimento até chegar-se ao estado estacionário. O comportamento do crescimento previsto por esse modelo para essa fase corresponde aos fatos estilizados do crescimento econômico no período anterior à Revolução Industrial.

²⁷ O algoritmo adotado nessas simulações não permite investimento em parcelas infinitesimais, não admitindo investimento em inovação tecnológica quando o produto é muito baixo.

A segunda fase

A segunda fase corresponde ao período começado com a Revolução Industrial. A introdução da tecnologia wattiana no período 50 marca o início dessa fase no qual a economia volta a crescer.

Figura 1.3(a): Fase 2 - visão de longo prazo

Figura 1.3(b): Fase 2 - em detalhe

Na primeira parte dessa fase o modelo apresenta um crescimento a uma taxa exponencial relativamente constante. Esse comportamento corresponde aos fatos estilizados associados ao crescimento atual que ocorre desde a Revolução Industrial.

No modelo essa elevada taxa de crescimento decorre da adoção da tecnologia wattiana que apresenta uma produtividade maior. Esse crescimento é sustentado pelo aumento de produtividade obtido com a inovação tecnológica, o que compensa os dispêndios crescentes na prospecção e pesquisa de recursos naturais. A aceleração da inovação tecnológica decorre do aumento da escala da economia, o que torna mais produtivo o investimento em pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Figura 1.4: Reservas desconhecidas

A partir do período 70 a taxa de crescimento começa a despencar, o que leva a economia a um período de declínio no final dessa fase. A queda na taxa de crescimento decorre da rápida dilapidação de recursos naturais desconhecidos (veja a figura 1.4). A queda no estoque de recursos naturais desconhecidos eleva o custo de prospecção e pesquisa de recursos naturais ao ponto que torna inviável o crescimento da economia dominada pela tecnologia wattiana.

(a) capital wattiano (k_{wt}/y_t)

(b) capital malthusiano (k_{mt}/y_t)

Figura 1.5 (a) e (b): Razão capital produto

As figuras 1.5 (a) e (b) mostram a acumulação de capital dos tipos de tecnologia. Na primeira fase a tecnologia malthusiana é a única tecnologia existente, o que é indicado pelo estoque estacionário de capital malthusiano, e o capital wattiano nulo. Quando a tecnologia wattiana é descoberta, o capital malthusiano de início é parcialmente abandonado, devido à produtividade superior da nova tecnologia. Após o salto inicial, o estoque de capital wattiano passa um curto período de declínio, devido aos custos crescentes de prospecção e pesquisa. Em seguida, os ganhos de produtividade decorrentes da inovação tecnológica superam temporariamente o aumento nos custos de prospecção e pesquisa, permitindo um curto período de crescimento do estoque de capital wattiano, até iniciar o seu declínio e sua substituição pelo capital malthusiano. Essa substituição ocorre de forma endógena e decorre do fato de que a maior parte dos recursos naturais utilizados na tecnologia malthusiana já são conhecidas e portanto somente envolvem o custo de cultivo e extração, enquanto a tecnologia wattiana requer novos recursos naturais, que envolvem pesados e crescentes dispêndios em prospecção e pesquisa.

A terceira fase

A terceira fase é caracterizada pela retomada do crescimento, mas agora a tecnologia malthusiana é a dominante. As duas tecnologias continuam sendo empregadas, mas a contínua redução na participação da tecnologia wattiana acarreta uma suave queda na taxa de crescimento da economia até convergir-se a uma taxa de crescimento constante de crescimento equilibrado.

Figura 1.3(c): Fase 3

A taxa de crescimento estacionária depende de dois fatores: a produtividade do investimento em pesquisa e desenvolvimento tecnológico e o nível do produto. A

produtividade do investimento em inovação tecnológica é um parâmetro que não pode ser afetado pelo comportamento dos agentes (depende exclusivamente dos parâmetros π_f , τ e ψ). O nível do produto, por outro lado, depende da dotação inicial de recursos naturais, mas também das decisões de investimento passadas. Isso significa que o comportamento dos agentes afeta o nível de potencial de crescimento da economia futura de forma permanente.

Neste modelo a tecnologia wattiana não é vista como uma tecnologia intrinsecamente ruim ou injusta, a ser combatida a qualquer custo por causa do seu uso de recursos naturais de forma não renovável. Neste modelo, a adoção da tecnologia wattiana pode ser usada de forma benéfica. A adoção da tecnologia wattiana dá um “empurrãozinho” à economia, o que beneficia tanto as gerações correntes, através dos ganhos de produtividade obtidos com a nova tecnologia, como as gerações futuras, através da acumulação do capital e do conhecimento técnico. Por outro lado, a tecnologia wattiana é responsável pela dilapidação do capital natural, o que afeta adversamente o bem-estar das gerações futuras. Assim, a questão da sustentabilidade é encarada como um desafio para se determinar qual é a dose certa de produção com a tecnologia wattiana, em vez de consistir no combate à sua utilização a qualquer custo.

1.4 Condições para a sustentabilidade

Para aprofundar-se o entendimento da questão da sustentabilidade é necessário um exame mais detalhado de como os parâmetros e condições iniciais afetam a trajetória nessa economia.

1.4.1 A intensidade relativa dos fatores de produção

Entre os parâmetros mais importantes para a determinação da trajetória de crescimento da economia descrita por esse modelo estão α e β . Esses dois parâmetros determinam a intensidade relativa com a qual os fatores de produção devem ser empregados em cada tecnologia para se maximizar a produção (dado um custo constante para os fatores de produção). O modelo apresenta uma grande sensibilidade a esses dois parâmetros, modificando consideravelmente as trajetórias de crescimento.

Para ilustrar o impacto desses parâmetros apresenta-se simulações com vários valores para α e β .

O parâmetro α determina a produtividade relativa dos fatores de produção empregados na tecnologia wattiana. Uma elevação do parâmetro α eleva a produtividade do capital e reduz a produtividade dos recursos naturais. O efeito da elevação do parâmetro α é suavizar e prolongar a fase 2, pois o ganho de produtividade inicial de se empregar a tecnologia wattiana diminui ao reduzir-se a importância do uso mais intensivo de recursos naturais obtido com essa tecnologia (em outras palavras, reduz-se a importância de ρ) e, por outro lado, a queda também é reduzida porque a produtividade da tecnologia wattiana é menos afetada pela crescente escassez de recursos naturais. Se o parâmetro α for demasiadamente elevado relativamente ao parâmetro β , a tecnologia wattiana nunca será adotada, e a Revolução Industrial, como descrita nesse modelo, nunca ocorreria. As figuras 1.6 (a), (b), (c) e (d) apresentam a progressão do log natural do produto da economia com diferentes valores de α .

(a) $\alpha = 0,68$

(b) $\alpha = 0,65$

Figura 1.6 (a), (b), (c) e (d): Crescimento com vários valores para α com $\beta = 0,55$

O parâmetro β , de forma análoga ao parâmetro α , afeta a produtividade relativa dos fatores de produção da tecnologia malthusiana. Se parâmetro β for muito elevado, mesmo com o conhecimento técnico acumulado durante a fase dois, a economia não consegue alcançar uma trajetória de crescimento sustentável, devido à baixa produtividade dos recursos naturais empregados na tecnologia malthusiana, o que torna anti-econômicos os dispêndios em de prospecção e pesquisa de novos recursos naturais. A baixa produtividade da tecnologia malthusiana, em relação à wattiana, significa que a tecnologia malthusiana só volta a ser empregada quando o estoque remanescente de recursos naturais e da produção como um todo está num nível muito baixo, tornando pouco rentável o investimento em inovação tecnológica (investimento necessário para viabilizar o crescimento balanceado).

(a) $\beta = 0,75$ (b) $\beta = 0,65$ (c) $\beta = 0,45$ **Figura 1.7 (a), (b) e (c): Crescimento com vários valores para β com $\alpha = 0,55$**

Por outro lado, se o parâmetro β for demasiadamente baixo, isto é, se produtividade do fator recursos naturais for muito maior que a do fator capital, a tecnologia wattiana apresentará pouca ou nenhuma vantagem com relação à tecnologia malthusiana. No caso apresentado na Figura 1.7(c) a Revolução Industrial (o emprego da tecnologia wattiana) se resume a um salto quase imperceptível na produção no período $t = 50$ seguido de um curto período de crescimento nulo, antes de retomar, a taxa de crescimento equilibrado. Esse seria o cenário mais otimista que se poderia esperar, porém a trajetória de crescimento dada por essa combinação de parâmetros não

corresponde aos fatos estilizados do crescimento observados antes e depois da Revolução Industrial.

1.4.2 A especificidade da tecnologia

A visão otimista relativa à economia futura tem como peça-chave o papel exercido pela inovação tecnológica. A inovação tecnológica contrabalança o efeito da escassez de recursos naturais sobre o crescimento da economia, ao aumentar a eficiência com a qual os recursos naturais são aproveitados. Assim, desde que o ritmo de inovação tecnológica seja suficientemente elevado, é possível manter-se o crescimento econômico mesmo com a redução contínua do estoque do capital natural. Neste modelo, entretanto, a inovação tecnológica pode ser parte do problema. Nas simulações apresentadas anteriormente o parâmetro τ sempre foi fixado em um. Isso significa que supõe-se que a inovação tecnológica é genérica: os esforços em pesquisa e desenvolvimento tecnológico beneficiam ambas as tecnologias de forma igual. Essa é uma hipótese forte. Entre as descobertas obtidas pela ciência pura e suas aplicações que proporcionam benefícios tangíveis para a sociedade há um enorme dispêndio de capital humano, físico e de tempo, que não podem ser negligenciados. As aplicações tecnológicas geralmente são muito específicas, freqüentemente envolvendo a resolução de problemas que são irrelevantes para outras aplicações. Assim, seria muito mais realista supor que os esforços empreendidos na inovação de uma determinada tecnologia beneficiem somente parcialmente a outra tecnologia.

Supor que as duas tecnologias apresentam especificidades, de forma que $\tau < 1$, implica que a inovação tecnológica pode ser parte do problema, impedindo o ajuste, via mercado, em direção a uma trajetória de crescimento sustentável. Na fase dois a economia apresenta uma taxa de crescimento elevado, o que aumenta a escala da economia e, conseqüentemente, aumenta a produtividade dos investimentos em inovação tecnológica. Quase toda a produção é realizada pela tecnologia wattiana nessa fase, o que significa que quase todo o esforço de pesquisa e desenvolvimento será direcionado à tecnologia wattiana nessa fase. Esse é um investimento irreversível, que proporcionará poucos benefícios para a economia na fase três, quando a tecnologia malthusiana volta a ser a tecnologia dominante. Além disso, quando a inovação tecnológica beneficia primordialmente a tecnologia wattiana, a diferença de

produtividade entre as duas tecnologias é aumentada durante a fase dois, o que prorroga o uso da tecnologia wattiana, levando à intensificação do período de declínio no final da fase dois.

Figura 1.8 (a) e (b): Crescimento e especificidade tecnológica

Como ilustram as simulações apresentadas nas figuras 1.8 (a) e (b), a especificidade da inovação tecnológica pode ser o fator que determinará se a economia alcançará ou não uma trajetória de crescimento sustentável.

1.4.3 Restrições decorrentes da necessidade de se manter os serviços ambientais

Os recursos naturais também prestam serviços ambientais essenciais à sustentação da vida. Para suprir esses serviços é necessário manter um estoque mínimo de capital natural intacto. Examina-se aqui o impacto que o abandono repentino da tecnologia wattiana teria sobre o crescimento econômico.

Figura 1.9: Crescimento com um limite ambiental $\bar{R}_t = 15.000$

As simulações sugerem que os impactos não seriam muito danosos, pelo contrário, a restrição anteciparia a adoção da tecnologia malthusiana, reduzindo a futura queda no produto. O único risco seria se isso acontecesse logo após a introdução da tecnologia wattiana, antes de a economia obter uma escala suficientemente elevada para estimular amplos investimentos na inovação tecnológica.

1.5 Intervenção no mercado

A análise anterior sugere que a economia pode não conseguir ajustar-se naturalmente em direção a uma trajetória de crescimento sustentável quando existe um hiato de produtividade muito grande entre as duas tecnologias. Esse hiato pode ser fruto de características intrínsecas das tecnologias ou de uma ampliação desse hiato em decorrência do investimento em pesquisa e desenvolvimento da tecnologia dominante na fase dois. Uma forma óbvia de se reduzir o risco do cenário pessimista, portanto, seria reduzir esse hiato através de um subsídio cruzado entre as duas tecnologias. No caso da tecnologia wattiana, a melhor medida seria taxar o uso de recursos naturais, já que é a depreciação do capital natural provocado pelo emprego dessa tecnologia que torna a obtenção de uma trajetória de crescimento equilibrado e sustentável menos provável. Note que a taxa da produção total pela tecnologia wattiana não seria desejável pois desencorajaria o uso mais eficiente dos recursos naturais e, conseqüentemente, reduziria o investimento em inovação tecnológica e a acumulação de capital. Já no caso da tecnologia malthusiana a melhor forma de promovê-la seria

alocando-se os recursos obtidos com a taxao em pesquisa e desenvolvimento dessa tecnologia.

Figura 1.10: Crescimento com interveno necessria

Simulaes adotando esse subsdio cruzado comprovam a sua eficincia. Considere por exemplo a economia com especificidade tecnolgica total ($\tau = 0$), com a trajetria de crescimento desastrosa apresentada na figura 1.8(b). Adotando-se um imposto de 30% sobre r_{wt} e utilizando-se os fundos arrecadados para financiar pesquisa e prospeco da tecnologia malthusiana, obtm-se a trajetria de crescimento apresentada na figura 1.10. Pode-se dizer, nesse caso, que o subsdio cruzado foi bem sucedido, pois permitiu economia alcanar o crescimento sustentvel. Note porm que a economia ainda sofre uma queda temporria do produto.

Figura 1.11: Crescimento com interveno desnecessria

A segunda questo que precisa ser considerada para decidir se deve-se intervir ou no na economia num ambiente de incerteza o custo potencial da interveno. Uma comparao da trajetria de crescimento da economia com e sem interveno, quando uma interveno seria desnecessria para se atingir uma trajetria de crescimento sustentvel serve para ilustrar essa idia. Considere a trajetria da

economia apresentada na figura 1.8(a). Se a intervenção proposta fosse introduzida nessa economia quais seriam as consequências? A simulação demonstra que há um grande ganho no longo prazo com o subsídio cruzado. Esse subsídio cruzado requer, entretanto, um sacrifício das gerações entre os períodos 65 e 77. O sacrifício é relativamente indolor, no sentido de que o subsídio acarreta somente uma redução da taxa de crescimento e nenhuma redução na produção em termos absolutos. E os ganhos são enormes. No período 200 a economia livre de intervenção obtém um produto de 911, enquanto a economia com intervenção obtém um produto de 3242. Esse enorme ganho decorre do fato de que o subsídio em inovação tecnológica corrige parcialmente a miopia dos agentes com relação aos benefícios da inovação tecnológica. A inovação tecnológica não se deprecia como o capital, nem envolve custos de cultivo e extração como os recursos naturais, mas proporciona benefícios permanentes para a economia (desde que a tecnologia continue sendo adotada). Dada a incerteza com relação à capacidade de adaptação da economia a uma trajetória de crescimento sustentável, uma intervenção através de um subsídio cruzado, como aqui proposto, seria uma boa medida de precaução, pois envolve poucos riscos e proporciona benefícios (mesmo quando desnecessária).

1.6 Conclusão

O modelo apresentado nesse ensaio é uma contribuição original à literatura de crescimento econômico e de economia dos recursos naturais e do meio ambiente. A sua originalidade consiste na representação da produção agregada através de duas funções que se diferenciam pela forma como utilizam os recursos naturais. Essa abordagem resulta num modelo macroeconômico de crescimento que incorpora o fator recursos naturais na função de produção agregada, de forma que a trajetória de crescimento se coaduna com os fatos estilizados. Com isso, o modelo possibilita uma nova perspectiva da questão de sustentabilidade da economia global e sugere formas de se lidar com o problema.

O modelo proposto nesse ensaio sugere que os recursos naturais são importantes determinantes do crescimento econômico e que podem ser incorporados na função de produção agregada de uma forma que se coaduna com os fatos estilizados do

crescimento no longo prazo. Ele mostra que a questão da sustentabilidade da economia é uma questão relevante que pode ou não requerer a intervenção do Estado, dependendo da intensidade relativa dos fatores nas duas tecnologias, da especificidade da inovação tecnológica, da convexidade da função custo de prospecção de recursos naturais e do estoque de recursos naturais desconhecidos.

A estrutura do modelo admite tanto o cenário vislumbrado pelos otimistas como o dos pessimistas, dependendo das condições iniciais e dos parâmetros da economia. Na visão otimista, o emprego de recursos naturais na tecnologia wattiana serve como um trampolim para acelerar o crescimento, beneficiando especialmente as primeiras gerações, mais pobres. Na visão pessimista, o emprego de recursos naturais na tecnologia wattiana permite um curto período de esbanjação às custas do bem-estar das gerações futuras. Seja qual for o cenário, entretanto, a economia muito provavelmente irá ter um período de declínio antes de atingir o estado de equilíbrio final.

Uma implicação importante do modelo é que a elevação dos preços dos recursos naturais decorrente de sua crescente escassez pode ser insuficiente para garantir o crescimento sustentável. Se a convexidade da função custo de pesquisa e prospecção de recursos naturais for suficientemente elevada é possível que os custos de pesquisa e prospecção sejam quase constantes por um longo período elevando-se somente quando o estoque de recursos naturais aproxima-se de zero. Isso levaria a migração tardia da tecnologia wattiana para a malthusiana quando o estoque remanescente de capital natural fosse insuficiente para permitir o crescimento sustentável.

O modelo sugere também que uma intervenção no mercado na forma de um subsídio cruzado poderia beneficiar a economia, reduzindo o risco de não se alcançar uma trajetória de crescimento sustentável. Esse subsídio cruzado consiste na taxação de recursos naturais empregados na tecnologia wattiana, com a arrecadação sendo aplicada em pesquisa e desenvolvimento da tecnologia malthusiana. Esse subsídio cruzado pode resultar numa pequena redução da taxa de crescimento da geração corrente e do futuro próximo, mas beneficia enormemente as gerações futuras. Os benefícios decorrentes dessa intervenção advêm do fato de que ela corrige parcialmente a miopia associada à desconsideração dos benefícios dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento para as gerações futuras. No modelo, os agentes determinam quanto

investir em pesquisa e desenvolvimento considerando somente os benefícios ao longo de suas vidas (no próximo período, os benefícios para os períodos seguintes são desconsiderados). Uma implicação interessante desse modelo é que a inovação tecnológica não é inequivocamente benéfica. A inovação tecnológica pode dificultar a adaptação da economia a uma trajetória de crescimento equilibrado sustentável. Isso decorre do fato de que há duas tecnologias. O modelo sugere que, na fase dois, a tendência é que a sociedade venha a investir cada vez mais em pesquisa e desenvolvimento da tecnologia wattiana, o que tende a afastar a economia do desenvolvimento sustentável. A pesquisa e desenvolvimento da tecnologia wattiana aumenta a produtividade de cada unidade de recurso natural empregado, porém exacerba a depreciação do capital natural, ao postergar a entrada da terceira fase, na qual a tecnologia malthusiana passa a ser a tecnologia dominante. O modelo aponta para a necessidade de se realizar investimentos em pesquisa e desenvolvimento de forma criteriosa, voltada ao aprimoramento da tecnologia malthusiana, para se garantir a obtenção da sustentabilidade.

1.7 Referências

- AGHION, P. e HOWITT, P. (1992). A Model of Growth through Creative Destruction. *Econometrica* 60: 323-351.
- AGHION, P. e HOWITT, P. (1999). *Endogenous Growth Theory*. Cambridge: The MIT Press.
- ARROW K. J. e FISHER, A. C. (1974). Environmental Preservation, Uncertainty, and Irreversibility. *Quarterly Journal of Economics* 88(2): 312-319.
- BARDINI, C. (1997). Without Coal in the Age of Steam: a factor-endowment explanation of the Italian industrial lag before World War I. *The Journal of Economic History* 57(3):633-653.
- BARNEY, G. O. (ed.) (1982). *The Global 2000 Report to the president entering the twentieth-first century: a report prepared by the Council on Environmental Quality and the Department of State*. New York: Penguin Books.
- BARRO, R e SALA-I-MARTIN, X. (1995). *Economic Growth*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- BEAUDREAU, B. C. (1998). *Energy and Organization: Growth and Distribution Reexamined*. Westport, CT: Greenwood Press.
- BELTRATTI, A. (1997). "Growth with natural and environmental resources" em CARRARO, C. E SINISCALCO, D. (ed.) *New directions in the economic theory of the environment*. Cambridge: Cambridge University Press.
- BROWN, G. M. (2000). Renewable Natural Resource Management and Use without Markets. *Journal of Economic Literature* 38(4): 875-914.
- CAMERON, R. (1997). *A Concise Economic History of the World: From Paleolithic Times to the Present*. Oxford: Oxford University Press.
- CARDWELL, D. (1995). *Wheels, Clocks, and Rockets: A History of Technology*. London: W. W. Norton & Company Ltd.
- COSTANZA, R. (ed.) (1991). *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability*. New York: Columbia University Press.
- COSTANZA, R. et alli (2000). Forum: The Ecological Footprint. *Ecological Economics* 32(3): 341-394.
- CARLSON, G. A.; ZILBERMAN, D. e MIRANOWSKI, J. (ed.) (1993). *Agricultural and Environmental Resource Economics*. New York: Oxford University Press.

- CLEVELAND, C. J.; KAUFMANN, R. K. e STERN, D. I. (2000). Aggregation and the role of energy in the economy. *Ecological Economics* 32(2): 301-318.
- DALY, H. E. (1997). *Beyond Growth: The Economics of Sustainable Development*. Beacon Press.
- DASGUPTA, P. (1982). *The Control of Resources*. Oxford: Basil Blackwell.
- DASGUPTA, P. e HEAL, G. M. (1974). The Optimal Depletion of Exhaustible Resources. *The Review of Economic Studies* (Symposium on the Economics of Exhaustible Resources): 3-28.
- DENISON, E. (1995). *Trends in American Economic Growth, 1929-1982*. Washington: The Brookings Institution.
- FISHER, A. C. (1981). *Resource and environmental economics*. (Cambridge Surveys of Economic Literature). Cambridge: Cambridge University Press.
- FOUQUET, R. e PEARSON, J. G. (1998). A Thousand Years of Energy Use in the United Kingdom. *The Energy Journal* 19(4): 1-41.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge: Harvard University Press.
- GOLDENBERG, J. (1998). *Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento*. São Paulo: Edusp.
- GROSSMAN G. e HELPMAN, E. (1991). *Innovation and Growth in the Global Economy*. Cambridge: The MIT Press.
- HANSEN, G. D. e PRESCOTT, E. C. (1999) Malthus to Solow. (mimeo) *Seminário Especial/99-21/06/99*. São Paulo: FEA-USP.
- HOWARTH, R. B. and NORGAARD, R. B. (1990). Intergenerational Resource Rights, Efficiency, and Social Optimality. *Land Economics* 66(1): 1-11.
- HUHTALA, A. (1999). Optimizing production technology choices: conventional production vs. recycling. *Resource and Energy Economics* 21(1): 1-18.
- JEVONS, W. S. (1906). *Coal Question: An inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines*. (3rd Edition). New York: Augustus M. Kelley, 1965.
- JONES, C. I. (2000). Was an Industrial Revolution Inevitable? Economic Growth Over the Very Long Run. (mimeo). Stanford University and NBER.
- KALDOR, N. (1963). Capital Accumulation and Economic Growth. em LUTZ, R. e HAGUE, C. (ed.) *Proceedings of a Conference Held by the International Economics Association*. London: Macmillan.

- KNEESE, A. V. e SWEENEY, J. L. (ed.) (1995). *Handbook of Natural Resources and Energy Economics*. Amsterdam: Elsevier Science B. V..
- KOMLOS, J. (1989). Thinking About the Industrial Revolution. *The Journal of European Economic History* 18(1): 191-206.
- KRAUTKRAEMER, J. A. (1998). Nonrenewable Resource Scarcity. *Journal of Economic Literature* 36(4): 2065-2107.
- LUCAS JR., R. (1988). On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics* 22(1): 3-42.
- LUCAS, JR. R. (1996). The Industrial Revolution: Past and Future. *Estudios Públicos* 64(spring): 1-16.
- MALTHUS (1803). *An Essay on the Principle of Population* (7th Edition). London: Everyman's Library, 1967.
- MILL (1857). *Principles of Political Economy: With some of their applications to social philosophy*. New York: Augustus M. Kelly, 1965.
- NORDHAUS e TOBIN (1972). *Economic Growth*. (NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH Fifth Anniversary Colloquium - General Series 96). New York: Columbia University Press.
- O'BRIEN, P. K. (1996). Path dependency, or why Britain became an industrialized and urbanized economy long before France. *The Economic History Review* 49(2): 213-249.
- PEARCE, D; MARKANDYA, A. e BARBIER, E. B. (1989). *Blueprint for a Green Economy*. London: Earthscan Publications Ltd.
- PERMAN, R.; MA, Y.; MCGILVRAY, J. e COMMON, M. (1999). *Natural Resource & Environmental Economics* (2nd Edition). Essex: Longman.
- PERRINGS, C. (ed.) (1998). Policy Forum: Environmental Scars – the Club of Rome debate revisited. *Environment and Development Economics* 3(4): 491-538.
- PORTNEY, P e WEYANT, J. (ed.) (1999). *Discounting and Intergenerational Equity*. Washington, DC: Resources for the Future.
- RANDALL, A. (1987). *Resource Economics: An Economic Approach to Natural Resource and Environmental Policy*. (2nd Edition). New York: John Wiley & Sons.
- RICARDO, D. (1821). *On the Principles of Political Economy and Taxation* (3rd Edition). London: Cambridge University Press, 1970.
- ROMER, P. M. (1986). Increasing Returns and Long-Run Growth. *Journal of Political Economy* 94:1002-1037.

- ROSENBERG, N. (1976). *Perspectives on Technology*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- RUBIO, S. J. e GOETZ, R. -U. (1998). Optimal growth and land preservation. *Resource and Energy Economics* 20(4): 345-372.
- SIMON, J e KAHN, H. (ed.) (1984). *Resourcefull Earth: a response to Global 2000*. Oxford: Basil Blackwell.
- SMITH, V. K. (ed.)(1979). *Scarcity and Growth Reconsidered*. (Resources for the Future). Baltimore: The Johns Hopkins University Press.
- SOLOW, R. M. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics* 70: 65-94.
- SOLOW, R. M. (1957). Technical Change and the Aggregate Production Function. *Review of Economics and Statistics* 39(3): 312-20.
- SOLOW, R. M. (1974). Intergenerational Equity and Exhaustible Resources. *The Review of Economic Studies* (Symposium on the Economics of Exhaustible Resources): 29-46.
- SOLOW, R. M (2000). *Growth Theory: An Exposition* (2nd Edition). Oxford: Oxford University Press.
- STIGLITZ, J. (1974a). Growth with Exhaustible Resources: Efficient and Optimal Growth Paths. *The Review of Economic Studies* (Symposium on the Economics of Exhaustible Resources): 123-138.
- STIGLITZ, J. (1974b). Growth with Exhaustible Resources: The Competitive Economy. *The Review of Economic Studies* (Symposium on the Economics of Exhaustible Resources): 139-152.
- SWAN, T. W. (1956). Economic Growth and Capital Accumulation. *Economic Record* 32: 334-361.
- TOMAN, M. A. (1994). Economics and “Sustainability”: Balancing Trade-offs and Imperatives. *Land Economics* 70(4): 399-413.

1.8 Apêndice

As simulações apresentadas nesse ensaio foram realizadas utilizando o Mathematica[®] 4.1 versão de estudante.

```
(* PARAMETROS *)

 $\alpha$  = .65;
 $\beta$  = .55;
 $\theta$  = 5.07;
 $\phi$  = .025;
 $\kappa f$  = 1;
 $\pi f$  = .02;
 $\kappa r$  = .015;
 $\eta$  = 2;
 $\rho$  = 10;
 $\tau$  = 1;
 $\psi$  = .2;
 $m_{\min}$  = 0;
 $p_0$  = 1.30;
 $p_{\text{inicio}}$  = 65;
parametros =
  Table[{{"a", "b", "phi", "kappa_r", "kappa_f", "pi_f", "eta", "theta", "tau", "psi", "R", "p"}, { $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\phi$ ,  $\kappa r$ ,  $\kappa f$ ,  $\pi f$ ,  $\eta$ ,  $\theta$ ,  $\tau$ ,  $\psi$ ,  $m_{\min}$ ,  $p_0$ }}];

(* condições iniciais *)

a0 = 2;
b0 = 2;
revolucaoindustrial = 50;
r10 = 0;
r20 = 200;
r0 = 200;
n0 = 19800;
k10 = 0;
k20 = 10;
dotacaoinicial = Table[{{"A0", "B0", "R0", "N0", "k10", "k20"}, {a0, b0, r0, n0, k10, k20}}];

(* variáveis de programação *)

j = 1;
jmax = 200;
lmax = 50;
mmax = 3;
decolar = 2;

a = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
b = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
r1 = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
r2 = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
r = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
n = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
k1 = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
k2 = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
c = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
e = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
y = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
i = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
s = Table[0 j, {j, jmax + 1}];
```

```

a[[1]] = a0;
b[[1]] = b0;
k1[[1]] = k10;
k2[[1]] = k20;
r1[[1]] = r10;
r2[[1]] = r20;
r[[1]] = r0;
n[[1]] = n0;
y[[1]] = b[[1]] k20β r2[[1]]1-β - φ r2[[1]];
i[[1]] = b[[1]] β k20β-1 r2[[1]]1-β;
s[[1]] = .3 y[[1]] Part[Part[Part[FindMinimum[-(Log[(1 - ss) y[[1]]) +  $\frac{1}{\theta}$  Log[ss i[[1]])], {ss, .1}], -1], -1], -1];;
di0 =  $\frac{s[[1]]}{l_{max}}$ ;
dr =  $\frac{di0}{m_{max}}$ ;
p = 1;

```

(*** ROTINA ***)

```

Do[
  cr = 0;
  inv1 = 0;
  df1 = 0;
  df2 = 0;
  If[j == pinicio, p = p0];

  (* investimento em incrementos de di1 *)

  If[s[[j]] > s[[1]],
    di1 = Max[ $\frac{s[[j]] - s[[1]]}{l_{max}}$ , di0];
    While[inv1 ≤ (s[[j]] - s[[1]] - di1),
      inv1 += di1;
      dn1 = 0;
      dn2 = 0;
      dr1 = 0;
      dr2 = 0;
      cr1 = 0;
      cr2 = 0;
      flagk1 = 0;
      flagr1 = 0;
      flagk2 = 0;
      flagr2 = 0;
      subsidio = 0;

      (* extração ótima de recursos naturais *)

      While[cr2 < di1,
        dr2 += dr;
        If[r2[[j]] + dr2 ≤ r[[j]] + dn2, cr2 += φ dr,
          cr2 += φ dr + κr  $\left(\frac{n0}{n[[j]] - dn2 - dr}\right)^\eta$  dr; dn2 += dr];
      ];
      If[cr2 > di1, dr2 -= dr;
        If[dn2 > 0, dn2 -= dr];
        While[cr1 < di1,
          dr1 += dr;
          dn1 += dr;
          cr1 += p  $\left(\phi dr + \kappa r \left(\frac{n0}{n[[j]] - dn1 - dr}\right)^\eta dr\right)$ ;
          subsidio += (p - 1)  $\left(\phi dr + \kappa r \left(\frac{n0}{n[[j]] - dn1 - dr}\right)^\eta dr\right)$ ;
        ];
        If[cr1 > di1, subsidio -= (p - 1)  $\left(\phi dr + \kappa r \left(\frac{n0}{n[[j]] - dn1 - dr}\right)^\eta dr\right)$ ; dr1 -= dr; dn1 -= dr];
      ];
    ];

```

(* investimento marginal ótimo *)

```

If[j < revolucaoindustrial || r[j] + n[j] ≤ xmin, ir1 = 0; ik1 = 0; if1 = 0,
  If[k1[j] = 0, k1[j] = di1 / decolar; flagk1 = 1];
  ir1 = (a[j] k1[j]α (ρ r1[j] + dr1)1-α - a[j] k1[j]α (ρ r1[j])1-α) / di1;
  If[flagk1 = 1, k1[j] = 0];
  If[r1[j] = 0, r1[j] = dr1 / decolar; flagr1 = 1];
  ik1 = (a[j] (k1[j] + di1)α (ρ r1[j])1-α - a[j] k1[j]α (ρ r1[j])1-α) / di1;
  If[flagr1 = 1, r1[j] = 0];
  If[r1[j] = 0 && k1[j] = 0, if1 = 0,
    if1 =
      
$$\left( \left( \frac{(df1 + di1 + \tau df2)^\psi}{\kappa f} \pi f + a[j-1] \right) k1[j]^\alpha (\rho r1[j])^{1-\alpha} + \left( \frac{(df2 + \tau (df1 + di1))^\psi}{\kappa f} \pi f + b[j-1] \right) k2[j]^\beta r2[j]^{1-\beta} - \left( \frac{(df1 + \tau df2)^\psi}{\kappa f} \pi f + a[j-1] \right) k1[j]^\alpha (\rho r1[j])^{1-\alpha} + \left( \frac{(df2 + \tau df1)^\psi}{\kappa f} \pi f + b[j-1] \right) k2[j]^\beta r2[j]^{1-\beta} \right) / di1 \right);$$

  If[k2[j] = 0, k2[j] = di1 / decolar; flagk2 = 1];
  ir2 = (b[j] k2[j]β (r2[j] + dr2)1-β - b[j] k2[j]β r2[j]1-β) / di1;
  If[flagk2 = 1, k2[j] = 0];
  If[r2[j] = 0, r2[j] = dr2 / decolar; flagr2 = 1];
  ik2 = (b[j] (k2[j] + di1)β r2[j]1-β - b[j] k2[j]β r2[j]1-β) / di1;
  If[flagr2 = 1, r2[j] = 0];
  If[r2[j] = 0 && k2[j] = 0 || j ≤ 2, if2 = 0,
    if2 =
      
$$\left( \left( \frac{(df2 + di1 + \tau df1)^\psi}{\kappa f} \pi f + b[j-1] \right) k2[j]^\beta r2[j]^{1-\beta} + \left( \frac{(df1 + \tau (df2 + di1))^\psi}{\kappa f} \pi f + a[j-1] \right) k1[j]^\alpha (\rho r1[j])^{1-\alpha} - \left( \frac{(df2 + \tau df1)^\psi}{\kappa f} \pi f + b[j-1] \right) k2[j]^\beta r2[j]^{1-\beta} + \left( \frac{(df1 + \tau df2)^\psi}{\kappa f} \pi f + a[j-1] \right) k1[j]^\alpha (\rho r1[j])^{1-\alpha} \right) / di1 \right);$$

  imax = Max[ir1, ir2, ik1, ik2, if1, if2];
  If[imax == ir1, r1[j] += dr1; r[j] += dn1 - dr1; n[j] -= dn1; cr += di1; df2 += subsidio;
    b[j] = b[j-1] +  $\frac{(df2 + \tau df1)^\psi}{\kappa f} \pi f$ ; a[j] = a[j-1] +  $\frac{(df1 + \tau df2)^\psi}{\kappa f} \pi f$ ];
  If[imax == ir2, r2[j] += dr2; r[j] += dn2; n[j] -= dn2; cr += di1];
  If[imax == ik1, k1[j] += di1];
  If[imax == ik2, k2[j] += di1];
  If[imax == if1, df1 += di1; a[j] = a[j-1] +  $\frac{(df1 + \tau df2)^\psi}{\kappa f} \pi f$ ; b[j] = b[j-1] +  $\frac{(df2 + \tau df1)^\psi}{\kappa f} \pi f$ ];
  If[imax == if2, df2 += di1; b[j] = b[j-1] +  $\frac{(df2 + \tau df1)^\psi}{\kappa f} \pi f$ ; a[j] = a[j-1] +  $\frac{(df1 + \tau df2)^\psi}{\kappa f} \pi f$ ];
];

```

(* investimento em incrementos de di0 *)

```

If[s[1] < s[j], resto = Round[ $\frac{(s[j] - s[1]) - inv1}{di0}$ ], resto = 0];

```

```

Do[
  dn1 = 0;
  dn2 = 0;
  dr1 = 0;
  dr2 = 0;
  cr1 = 0;
  cr2 = 0;
  flagk1 = 0;
  flagr1 = 0;
  flagk2 = 0;
  flagr2 = 0;
  subsidio = 0;

```

(* extração ótima de recursos naturais *)

```
While[cr2 < di0,
  dr2 += dr;
  If[r2[[j]] + dr2 ≤ r[[j]] + dn2, cr2 += ϕ dr,
    cr2 += ϕ dr + κr  $\left(\frac{n0}{n[[j]] - dn2 - dr}\right)^\eta$  dr; dn2 += dr];
];
If[cr2 > di1, dr2 -= dr;
  If[dn2 > 0, dn2 -= dr];
While[cr1 < di0,
  dr1 += dr;
  dn1 += dr;
  cr1 += p  $\left(\phi dr + \kappa r \left(\frac{n0}{n[[j]] - dn1 - dr}\right)^\eta dr\right)$ ;
  subsidio += (p - 1)  $\left(\phi dr + \kappa r \left(\frac{n0}{n[[j]] - dn1 - dr}\right)^\eta dr\right)$ ;
];
If[cr1 > di1, subsidio -= (p - 1)  $\left(\phi dr + \kappa r \left(\frac{n0}{n[[j]] - dn1 - dr}\right)^\eta dr\right)$ ; dr1 -= dr; dn1 -= dr];
```

(* investimento marginal ótimo *)

```
If[j < revolucaoindustrial || r[[j]] + n[[j]] ≤ xmin, ir1 = 0; ik1 = 0; if1 = 0,
  If[k1[[j]] == 0, k1[[j]] = di0 / decolar; flagk1 = 1];
  ir1 = (a[[j]] k1[[j]]α (ρ (r1[[j]] + dr1))1-α - a[[j]] k1[[j]]α (ρ r1[[j]])1-α) / di0;
  If[flagk1 == 1, k1[[j]] = 0];
  If[r1[[j]] == 0, r1[[j]] = dr1 / decolar; flagr1 = 1];
  ik1 = (a[[j]] (k1[[j]] + di0)α (ρ r1[[j]])1-α - a[[j]] k1[[j]]α (ρ r1[[j]])1-α) / di0;
  If[flagr1 == 1, r1[[j]] = 0];
  If[r1[[j]] == 0 && k1[[j]] == 0, if1 = 0,
    if1 =
      
$$\left( \left( \frac{(df1 + di0 + \tau df2)^\psi}{\kappa f} \pi f + a[[j-1]] \right) k1[[j]]^\alpha (\rho r1[[j]])^{1-\alpha} + \right.$$


$$\left. \left( \frac{(df2 + \tau (df1 + di0))^\psi}{\kappa f} \pi f + b[[j-1]] \right) k2[[j]]^\beta r2[[j]]^{1-\beta} \right) -$$


$$\left( \left( \frac{(df1 + \tau df2)^\psi}{\kappa f} \pi f + a[[j-1]] \right) k1[[j]]^\alpha (\rho r1[[j]])^{1-\alpha} + \left( \frac{(df2 + \tau df1)^\psi}{\kappa f} \pi f + b[[j-1]] \right) k2[[j]]^\beta r2[[j]]^{1-\beta} \right) / di0];
  If[k2[[j]] == 0, k2[[j]] = di0 / 10; flagk2 = 1];
  ir2 = (b[[j]] k2[[j]]β (r2[[j]] + dr2)1-β - b[[j]] k2[[j]]β r2[[j]]1-β) / di0;
  If[flagk2 == 1, k2[[j]] = 0];
  If[r2[[j]] == 0, r2[[j]] = dr2 / 10; flagr2 = 1];
  ik2 = (b[[j]] (k2[[j]] + di0)β r2[[j]]1-β - b[[j]] k2[[j]]β r2[[j]]1-β) / di0;
  If[flagr2 == 1, r2[[j]] = 0];
  If[r2[[j]] == 0 && k2[[j]] == 0 || j ≤ 2, if2 = 0,
    if2 =
      
$$\left( \left( \frac{(df2 + di0 + \tau df1)^\psi}{\kappa f} \pi f + b[[j-1]] \right) k2[[j]]^\beta r2[[j]]^{1-\beta} + \left( \frac{(df1 + \tau (df2 + di0))^\psi}{\kappa f} \pi f + a[[j-1]] \right) k1[[j]]^\alpha (\rho r1[[j]])^{1-\alpha} \right) -$$


$$\left( \left( \frac{(df2 + \tau df1)^\psi}{\kappa f} \pi f + b[[j-1]] \right) k2[[j]]^\beta r2[[j]]^{1-\beta} + \left( \frac{(df1 + \tau df2)^\psi}{\kappa f} \pi f + a[[j-1]] \right) k1[[j]]^\alpha (\rho r1[[j]])^{1-\alpha} \right) / di0];
  If[flagr2 == 1, r2[[j]] = 0];
  imax = Max[ir1, ir2, ik1, ik2, if1, if2];
  If[imax == ir1, r1[[j]] += dr1; r[[j]] += dn1 - dr1; n[[j]] -= dn1; cr += di0; df2 += subsidio;
    b[[j]] = b[[j-1]] +  $\frac{(df2 + \tau df1)^\psi}{\kappa f} \pi f$ ; a[[j]] = a[[j-1]] +  $\frac{(df1 + \tau df2)^\psi}{\kappa f} \pi f$ ;
  If[imax == ir2, r2[[j]] += dr2; r[[j]] += dn2; n[[j]] -= dn2; cr += di0];
  If[imax == ik1, k1[[j]] += di0];
  If[imax == ik2, k2[[j]] += di0];
  If[imax == if1, df1 += di0; a[[j]] = a[[j-1]] +  $\frac{(df1 + \tau df2)^\psi}{\kappa f} \pi f$ ; b[[j]] = b[[j-1]] +  $\frac{(df2 + \tau df1)^\psi}{\kappa f} \pi f$ ;
  If[imax == if2, df2 += di0; b[[j]] = b[[j-1]] +  $\frac{(df2 + \tau df1)^\psi}{\kappa f} \pi f$ ; a[[j]] = a[[j-1]] +  $\frac{(df1 + \tau df2)^\psi}{\kappa f} \pi f$ ;
  , {1, (lmax + resto)}];$$$$

```


(* atualização *)

```

e[[j]] =  $\frac{cr}{r1[[j]] + r2[[j]]}$ ;
y[[j]] = a[[j]] k1[[j]]α (ρ r1[[j]])1-α + b[[j]] k2[[j]]β r2[[j]]1-β;
i[[j]] = imax;
s[[j+1]] = y[[j]] Part[Part[Part[FindMinimum[-(Log[(1-ss) y[[j]]] +  $\frac{1}{\theta}$  Log[ss i[[j]])], {ss, .1}], -1], -1], -1];
a[[j+1]] = a[[j]];
b[[j+1]] = b[[j]];
r[[j+1]] = r[[j]];
n[[j+1]] = n[[j]];
Print[TableForm[{{"período", "Y", "k1", "k2", "r1", "r2", "N", "R", "A", "B", "i", "if", " $\frac{s}{y}$ "},
{
j, y[[j]], k1[[j]], k2[[j]], r1[[j]], r2[[j]], n[[j]], r[[j]], a[[j]], b[[j]], i[[j]], Max[if1, if2],  $\frac{s[[j]]}{y[[j]]}$ 
}
}], {j, jmax}];

```

(*** RESULTADOS ***)

```

Print["Parametros"];
Print[TableForm[parametros]];
Print[];
Print["Condições Iniciais"];
Print[TableForm[dotacaoinicial]];
Print[];
Print["PRODUTO"];
ListPlot[y, PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["LOG DO PRODUTO"];
ListPlot[Log[y], PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["LOG DO PRODUTO - close-up"];
ListPlot[Log[y], AxesOrigin->{12, 0}, PlotJoined->False, PlotRange->{{13, 200}, {0.1, 10}}];
Print[];
Print["CAPITAL DO TIPO 1"];
ListPlot[k1, PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["CAPITAL DO TIPO 1 PER PRODUTO"];
ListPlot[k1/y, PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["CAPITAL DO TIPO 2"];
ListPlot[k2, PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["CAPITAL DO TIPO 2 PER PRODUTO"];
ListPlot[k2/y, PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["INTENSIDADE DE USO DE RECURSOS NATURAIS NO PRODUTO"];
ListPlot[Abs[(r1+r2)/y], PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["RESERVAS CONHECIDAS"];
ListPlot[r, PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["RESERVAS DESCONHECIDAS"];
ListPlot[n, PlotJoined->False, PlotRange->All];
(* Print["RECURSOS NATURAIS UTILIZADOS NA TECNOLOGIA 1"];
ListPlot[r1, PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["RECURSOS NATURAIS UTILIZADOS NA TECNOLOGIA 2"];
ListPlot[r2, PlotJoined->False, PlotRange->All]; *)
Print["TAXA DE RETORNO DO INVESTIMENTO"];
ListPlot[i, PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["CUSTO UNITÁRIO DE 'EXTRAÇÃO' "];
ListPlot[e, PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["TECNOLOGIA 1"];
ListPlot[a, PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["LOG DA TECNOLOGIA 1"];
ListPlot[Log[a], PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["TECNOLOGIA 2"];
ListPlot[b, PlotJoined->False, PlotRange->All];
Print["LOG DA TECNOLOGIA 2"];
ListPlot[Log[b], PlotJoined->False, PlotRange->All];

```

2 Recursos Naturais Heterogêneos e o Mercado

Em junho de 2001 o Brasil iniciou o maior programa de racionamento de sua história. Metas de consumo foram estabelecidas para todos os cidadãos, comerciantes e indústrias nos submercados elétricos do Sudeste/Centro-Oeste e Nordeste. O racionamento buscava uma redução do consumo de 20%.²⁸ Uma sobretaxa foi imposta sobre o consumo acima da meta, e os consumidores que excedessem a meta repetidamente passaram a ficar sujeitos a cortes de energia de até 6 dias. Não foi a primeira vez que a população brasileira foi submetida a um racionamento, mas esse foi o mais abrangente racionamento que ela já enfrentou.²⁹

A crise provocou um questionamento generalizado das reformas do setor elétrico no Brasil visando introduzir a concorrência nos segmentos de geração e comercialização da energia elétrica. Manchetes de jornais anunciavam o desmantelamento do modelo do setor elétrico; no Congresso Nacional, deputados articulavam-se para suspender o processo de privatizações das estatais remanescentes do setor elétrico; paralelamente, segmentos da população clamavam pela re-estatização do setor, culpando o Fundo Monetário Internacional pela falta de investimentos no setor nos últimos anos.

O Brasil não foi o único lugar a defrontar-se com problemas relativos a mercados de energia. O mercado de energia elétrica da Califórnia já sofria com desabastecimento e preços elevadíssimos desde meados do ano 2000 e a Inglaterra –um dos primeiros países a introduzir um mercado de energia elétrica– continuava sua longa luta para aumentar o grau de concorrência no setor. A percepção era, portanto, de que

²⁸ O racionamento foi aplicado de forma uniforme sobre os segmentos residencial, comercial e industrial. No segmento industrial o racionamento foi aplicado de forma diferenciada entre os diferentes setores a fim de reduzir o impacto sobre a economia e o emprego. Em seguida foi criado um mercado secundário, sob a coordenação da ASMAE, para permitir aos grandes consumidores comercializarem a sua “energia excedente” (montante de energia economizado além da meta).

²⁹ A experiências passadas de racionamentos no Brasil estão relatadas no livro elaborado pela Memória da Eletricidade, sob a coordenação de Feliciano Dias (1996).

havia um problema fundamental com os mercados de energia elétrica. Questionou-se não só a forma como o mercado de energia elétrica brasileiro havia sido estruturado, mas também a viabilidade de se coordenar via mercado as atividades do setor elétrico.

Coordenar as atividades produtivas via mercados é particularmente difícil no setor elétrico. Sistemas elétricos requerem que a oferta e a demanda sejam sincronizadas, pois a energia elétrica não pode ser estocada de maneira econômica. Isso significa que, se o mercado não for bem estruturado, o setor incorrerá em altos custos de transação para lidar com o elevado grau de coordenação necessário. Outro desafio apresentado pelo setor elétrico é a necessidade de se compatibilizar tecnologias muito diferentes. As tecnologias tradicionalmente empregadas no setor elétrico apresentam uma elevada proporção de investimentos irreversíveis, que exigem um alto grau de comprometimento por parte dos agentes. Para viabilizar os investimentos e o uso dessas tecnologias é preciso que uma série de condições sejam atendidas. O problema é que às vezes as condições requeridas por uma tecnologia são diferentes das condições requeridas por outra tecnologia. Neste caso um mecanismo de mercado adequado para uma tecnologia pode não ser compatível com outra. É necessário muito cuidado para desenvolver mecanismos de mercado que compatibilize o emprego de ambas tecnologias.

Na raiz dessas dificuldades está o fato de que os recursos naturais empregados na produção de energia elétrica são heterogêneos. Os diversos recursos naturais empregados apresentam propriedades muito diferentes, que implicam riscos e incertezas, estrutura de custos diferenciados. Poderia-se optar por utilizar um único tipo de recurso natural para a produção de energia elétrica, mas geralmente essa opção não é a mais econômica, devido à dotação dos recursos naturais e devido à existência de complementaridades entre os diferentes recursos naturais.

Há dois tipos básicos de recursos naturais utilizados na geração de energia elétrica. O primeiro tipo é formado pelos recursos naturais à livre disposição, isto é, a sua oferta não depende do esforço humano. Uma vez realizado o investimento inicial na tecnologia, a captação da energia desse tipo de recurso natural incorre custos insignificantes. Após a etapa de investimentos a energia desses recursos é obtida sem

ônus.³⁰ Geralmente esse tipo de recursos naturais apresenta uma oferta estocástica. Para se gerar energia elétrica a partir destes recursos naturais basta instalar uma usina para captar a sua energia. A disponibilidade desse tipo de recurso natural depende exclusivamente dos estados da natureza, que geralmente apresentam um componente cíclico e um componente aleatório. Exemplos desse tipo de recursos naturais são as energias hidrelétrica, solar, eólica e fotovoltaica. O segundo tipo é formado pelos recursos naturais que precisam ser extraídos da natureza através do esforço humano para gerar energia. Exemplos desse tipo de recursos naturais são o gás natural, o óleo combustível, o óleo diesel, o carvão e o bagaço de cana. No setor elétrico esses dois tipos de recursos naturais dão origem a duas tecnologias distintas no segmento de geração, que são representadas por dois tipos de usinas dominantes: hidrelétricas e termelétricas.

A capacidade de geração de energia elétrica de uma hidrelétrica depende primordialmente das condições hidrológicas, que podem variar significativamente de ano a ano. Os custos das hidrelétricas dependem das condições específicas do potencial hidráulico (o fluxo de água, a altura da queda, o tipo e dimensão da barragem, a quantidade de terras desapropriadas, a distância da transmissão até os centros de carga, etc.) A estrutura de custos das hidrelétricas é comum, no sentido de que elas apresentam custos variáveis próximos de zero e elevados custos fixos e irreversíveis.

As termelétricas apresentam uma tecnologia mais padronizada, logo seus custos são homogêneos (para cada tipo de usina, capacidade, combustível, etc.). As termelétricas também apresentam custos fixos e irreversíveis, mas os custos variáveis respondem por uma parte substancial dos custos totais, devido ao custo de obtenção do combustível utilizado. Ao contrário das hidrelétricas, as termelétricas podem ser instaladas onde for economicamente mais interessante e elas geralmente requerem um período instalação menor. As termelétricas tipicamente não podem ser operadas de forma tão flexível quanto as hidrelétricas, pois elas requerem um tempo de partida relativamente grande –a exceção sendo as usinas a gás natural de ciclo simples (usinas de turbina a jato).

³⁰ O uso deste tipo de recursos naturais não implica um custo direto, mas pode haver um custo de oportunidade devido à privação de usos alternativos do recurso natural, ou um custo indireto, devido ao efeito deste uso dos recursos naturais sobre o meio ambiente (externalidades).

O setor elétrico brasileiro representa um estudo de caso interessante não só em função do processo atual de implementação do Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE), mas também porque tem sido promovida a diversificação da matriz energética para se diminuir sua dependência de energia hidrelétrica, incentivando-se a instalação de termelétricas a gás natural (e fontes alternativas). Trata-se de um grande desafio, pois o setor elétrico requer muita coordenação, tanto pela ótica do produto como pelo lado dos fatores de produção empregados. Para que essa coordenação ocorra de forma satisfatória num processo decisório descentralizado é preciso um arranjo institucional e um mecanismo de mercado que definam os direitos e responsabilidades dos agentes e proporcionem uma estrutura de incentivos apropriada.

Assim como um arquiteto precisa incorporar o conhecimento da engenharia e das artes para garantir a funcionalidade e solidez da estrutura que cria, um mercado também precisa de uma boa arquitetura para garantir sua eficiência e sustentabilidade. A arquitetura de mercado engloba o arranjo institucional e o(s) mecanismo(s) de mercado(s) empregado(s).

Esse ensaio analisa o setor elétrico brasileiro para identificar os requisitos fundamentais que a arquitetura de mercado precisa satisfazer para garantir a operação e a expansão eficientes do sistema elétrico. A identificação dos requisitos fundamentais de um plano arquitetônico para o mercado de energia elétrica no Brasil requer, primeiramente, a identificação das características do setor elétrico brasileiro, o que é feito na seção 2.1. Em seguida é necessário determinar a configuração mais apropriada para o parque gerador, dado o parque hidrelétrico já instalado, e a forma mais eficiente de operar esse parque gerador. Para tentar responder essa questão desenvolve-se o modelo apresentado na seção 2.2. Na seção 2.3 são realizadas simulações para ilustrar como o modelo pode ser utilizado para identificar a configuração ótima para o parque termelétrico, dado um parque hidrelétrico existente, e para orientar a operação de forma ótima. Na seção 2.4 propõe-se uma arquitetura que atenderia os requisitos básicos necessários para que os agentes do setor elétrico, ainda que agindo de forma descentralizada, façam-no de forma concertada que se aproxime da forma prescrita pelo modelo. A conclusão é apresentada na seção 2.5.

Esse ensaio contém duas contribuições para a literatura especializada:

- um modelo analítico simples que resume o processo de otimização do investimento e da operação do setor elétrico, e
- uma proposta de arquitetura de mercado para o setor elétrico brasileiro.

A contribuição do modelo analítico não decorre do emprego de novas técnicas de otimização, mas sim do seu papel didático. O modelo apresenta de forma simples e concisa os principais componentes do processo de otimização do investimento e da operação do setor elétrico. O modelo proporciona um arcabouço teórico que unifica uma série de conceitos e processos utilizados na otimização desse setor e permite a identificação dos fatores mais importantes na otimização de um parque gerador de predominância hídrica, como o brasileiro, o que é indispensável para orientar o processo de reestruturação do setor.³¹

A segunda contribuição desse ensaio é a apresentação de um esboço de arquitetura de mercado para o setor elétrico brasileiro. A arquitetura de mercado proposta busca identificar um arranjo institucional e mecanismos de mercado que internalizem os principais componentes do processo de otimização do setor elétrico. A reestruturação do setor elétrico brasileiro resultou numa liberalização parcial do mercado, na qual o controle e o poder de ação foram compartilhados entre os agentes de forma assimétrica. A arquitetura de mercado proposta busca atribuir aos agentes as diferentes funções conforme a sua capacidade de desempenhá-las. Essa proposta requer uma liberalização maior do setor elétrico, proporcionando às empresas de geração maior controle sobre as suas usinas e, em contrapartida, requer delas um comprometimento pelo suprimento adequado. Isso significa permitir que as empresas de geração definam quanto as suas usinas podem gerar –isto é, definam a sua energia assegurada– e como as suas usinas serão despachadas. Por outro lado, as empresas de geração seriam responsabilizadas pelo suprimento da carga, estando obrigadas a indenizar os consumidores (pagar o custo de déficit) caso não honrassem os seus compromissos.

³¹ Nesse ensaio, emprega-se esse modelo somente para analisar a expansão do parque gerador térmico, mas o modelo também pode ser adotado para a otimização da expansão por usinas hidrelétricas.

2.1 O setor elétrico brasileiro

O parque gerador brasileiro é predominantemente hidrelétrico. Mais de noventa por cento da eletricidade consumida no Brasil é gerada por hidrelétricas. Hidrelétricas de grande porte (definidas como usinas com uma potência instalada igual ou superior a 1GW) respondem por mais de oitenta por cento da eletricidade gerada no país. Essas grandes hidrelétricas freqüentemente estão localizadas longe dos centros de carga, requerendo linhas de transmissão de alta tensão para transportar a energia. Conseqüentemente, a rede de transmissão brasileira apresenta uma proporção mais elevada de linhas de alta tensão de longa extensão que outros sistemas elétricos, nos quais o parque gerador é dominado por termelétricas relativamente próximas aos centros de carga. Essa característica da rede de transmissão brasileira facilitou a integração do sistema, apesar das grandes distâncias envolvidas. A integração do sistema elétrico é benéfica porque aumenta a confiabilidade do sistema, permite o aproveitamento da diversidade sazonal entre as diversas bacias hidrográficas, e aumenta a dimensão do mercado, o que facilita a concorrência.

A capacidade de geração de uma hidrelétrica depende de três fatores: a potência instalada, a energia natural afluyente e o volume de energia armazenada. O primeiro fator refere-se à capacidade das turbinas e geradores instalados na usina, o segundo depende do regime fluvial do rio no qual a usina se encontra, e o terceiro, da quantidade armazenada no(s) reservatório(s) a montante da hidrelétrica. As hidrelétricas geralmente são dimensionadas com uma potência instalada elevada relativamente à energia afluyente, para permitir que a usina seja operada com mais flexibilidade.³² Assim, esse fator raramente torna-se um fator limitante. A verdadeira limitação de uma hidrelétrica é a disponibilidade de água a montante da hidrelétrica, que depende do regime fluvial do rio, que, por sua vez, pode ser alterado por reservatórios.

Pode-se representar o regime fluvial como um processo estocástico, tendo um componente sazonal e um componente aleatório. Às vezes um componente

³² As hidrelétricas são dimensionadas com uma potência instalada elevada para atender à demanda de ponta. Geralmente as hidrelétricas podem atender à demanda de ponta de forma mais econômica do que as usinas térmicas devido ao custo relativamente baixo de instalação de potência adicional em hidrelétricas, e devido aos custos associados ao tempo de partida requerido em usinas térmicas.

autoregressivo é apropriado devido ao escoamento da água absorvida no subsolo no(s) período(s) anterior(es).³³ A relevância desse componente depende das características geológicas da(s) bacia(s) hidrográfica(s) em questão. Na maioria dos rios esse componente autoregressivo é pouco significativo para a previsão de vazões anuais.³⁴ No modelo apresentado nesse ensaio o componente autoregressivo é negligenciado. A exclusão do componente autoregressivo é uma prática comum em estudos de planejamento do setor elétrico brasileiro.³⁵

Figura 2.1: Distribuição da energia afluyente anual na região sudeste

Vários estudos empíricos sugerem que a inclusão de um componente cíclico não é indicado, pois o componente ciclo geralmente é não significante estatisticamente.³⁶ O componente sazonal deriva-se do regime pluvial anual. O componente aleatório é o que proporciona o maior desafio no caso brasileiro. O efeito do componente aleatório na energia afluyente é elevado. A figura 2.1 apresenta a distribuição histórica da energia

³³ O capítulo 6 de Righetto (1998) expõe o modelo autoregressivo como uma forma de representar a hidrologia.

³⁴ Gomide e Cunha (1981) afirmam que o grau de autocorrelação das vazões anuais é pequeno e geralmente pode ser negligenciado. Maceira, Kelman e Damázio (1987) indicam a inclusão do componente autoregressivo para períodos menores de um ano, mas que é pouco significativo para a previsão de vazões anuais. Eles destacam que o modelo adotado na otimização do sistema elétrico brasileiro na época utilizava o modelo Thomas-Fiering, que não apresenta correlação anual. Apesar da autocorrelação anual ser pequena e pouco significativa, ela é importante pois implica que uma probabilidade maior de ocorrência de períodos de seca consecutivos, o que aumenta consideravelmente a probabilidade de déficit (Xavier e Xavier, 1987).

³⁵ Pereira, Costa, Campodónico e Gorenstin (1987) afirmam que o problema de operação do setor elétrico brasileiro é essencialmente estocástico e que o componente autoregressivo freqüentemente não é considerado na determinação da energia assegurada do sistema ou na análise de outros índices de desempenho do sistema.

³⁶ Barth, F. T. *et al.* (1987), pp. 360, 365-78.

afluente anual da região sudeste. A média é representada pela linha horizontal. Observa-se que a energia afluente varia de cerca de 17 GW-médios³⁷ a cerca de 60 GW-médios: um fator de 3,5. Além disso, a distribuição de cenários hidrológicos não é simétrica: os cenários hidrológicos favoráveis (acima da média) apresentam uma variância maior do que os cenários desfavoráveis (abaixo da média), sugerindo que a cauda direita da distribuição é alongada. Essa assimetria é confirmada por estudos empíricos como o de Fernandes e Fill (1991).

O uso de reservatórios permite a suavização do regime fluvial ao longo do tempo. O sistema elétrico brasileiro é dotado de reservatórios de grande porte, que permitem a suavização do fluxo de água do rio, não só ao longo do período seco e úmido do ano, mas, também, de um ano para o outro. Em outras palavras, os reservatórios permitem a regularização completa do componente sazonal e, uma suavização, parcial do componente aleatório. Para exemplificar a magnitude dos reservatórios brasileiros, apresenta-se na figura 2.2 uma simulação do volume armazenado no reservatório de Furnas entre 1931 e 2001. O reservatório de Furnas é o quarto maior do Brasil, com um volume útil³⁸ de 17.217 hm³. Tradicionalmente, somente um quarto do volume útil do reservatório de Furnas tem sido utilizado para regularizar a oferta de energia ao longo do ciclo de chuvas anual, tendo o volume de armazenamento remanescente do reservatório servido para situações excepcionais, como, por exemplo, vários anos seguidos de hidrologia desfavorável (como no período de 1952 a 1956).

³⁷ GW-médios é a potência que se pode gerar em média com a energia afluente natural disponível ao longo de um ano. Logo, 17 GW-médios equivale a 148.920 GWh/ano.

³⁸ O volume útil é o volume máximo de armazenagem do reservatório menos o volume morto, representado na figura 2.2 pela linha horizontal um pouco acima de 5000. O volume morto é o volume de água que fica abaixo do nível da entrada das turbinas da hidrelétrica. O volume morto permite o acúmulo de sedimentação sem afetar a capacidade de armazenamento do reservatório.

Figura 2.2: Simulação histórica do volume armazenado na usina de Furnas (1931-2001)

A tecnologia hidrelétrica apresenta um *tradeoff* incontornável entre o grau de confiabilidade do fornecimento de energia elétrica e o grau de aproveitamento energético dos recursos hídricos. Quanto mais elevada for a quantidade de energia gerada pelas hidrelétricas, menor será o custo unitário da energia, mas, também, maior será a probabilidade de déficits em períodos de hidrologia desfavorável (períodos secos). Isso é um problema, pois a confiabilidade é muito valorizada pelo consumidor.

A alta valorização da confiabilidade do fornecimento de energia elétrica deve-se a dois motivos. Em primeiro lugar porque a energia elétrica não pode ser economicamente armazenada. Em segundo lugar porque a utilidade da eletricidade para o consumidor é condicionada ao tempo, isto é, o valor auferido de um determinado montante de energia elétrica num dado momento não é necessariamente o mesmo daquele ofertado em outro momento. Isso implica que um déficit de energia num dado momento não pode ser compensado por uma oferta adicional de energia elétrica noutro momento. Neste sentido, a função de utilidade de energia elétrica, $u(q)$, é côncava: um consumo de energia elétrica abaixo da média no período 1, q_1 , não é compensado pelo consumo adicional no período 2, como ilustrado na figura 2.3. Os grandes reservatórios existentes no parque gerador brasileiro reduzem esse problema, ao suavizar o fluxo de água no rio ao longo do tempo. Por esse motivo, a operação apropriada desses reservatórios é crucial para a otimização do sistema elétrico brasileiro.

Figura 2.3: A função utilidade

Há várias formas de se determinar a forma ótima de se gerenciar esses reservatórios.³⁹ Uma forma é calcular o custo de oportunidade da água intertemporalmente e então operar o sistema de forma a minimizar esse custo. Essa é a forma correntemente usada no Brasil através do programa NEWAVE, que baliza a otimização realizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS).⁴⁰ Outra forma de se determinar a forma ótima de gerenciar os reservatórios das hidrelétricas é definir o nível de energia assegurada com o qual o custo intertemporal é minimizado. Essa forma de otimização é possível quando existe independência entre a energia afluyente natural de ano para ano, como suposto nesse ensaio.⁴¹ A energia assegurada é o nível de energia que as usinas podem ofertar de forma consistente (com uma dada probabilidade de desvios). Neste regime de otimização o conjunto de hidrelétricas normalmente gera o nível de energia assegurada pre-estabelecido. O nível gerado é menor somente quando não há energia afluyente e armazenada suficiente para gerar esse montante (os reservatórios apresentam um volume útil nulo), e é maior somente quando os reservatórios estão cheios (a fim de evitar o vertimento da energia afluyente). No segundo caso, a energia adicional gerada é denominada energia secundária. Essa é a metodologia que será adotada no modelo apresentado na seção 2.2.

Mesmo quando os reservatórios são perfeitamente gerenciados não é possível regularizar totalmente a geração hidrelétrica. As termelétricas, por outro lado, não apresentam essa dependência nos estados da natureza. Elas utilizam recursos naturais

³⁹ Não há uma metodologia consagrada para o planejamento e operação de reservatórios (Zahed, 1987).

⁴⁰ Maceira (1993) descreve o algoritmo da programação dinâmica dual estocástica adotada pelo NEWAVE.

⁴¹ Para os fins de planejamento as duas metodologias são análogas.

na forma de combustível. A disponibilidade de combustível depende das atividades de exploração, transporte e armazenamento. Essas atividades são conduzidas pelo esforço humano e portanto podem ser controladas, mas há um custo. As atividades humanas requerem uma remuneração, portanto o combustível é custoso. Já a energia afluenta de uma hidrelétrica independe do esforço humano, não envolvendo nenhum custo direto. Isso dá origem a uma complementaridade entre as tecnologias hidrelétrica e termelétrica pois, enquanto a energia hidrelétrica é preferível, por ter um custo marginal menor do que a energia termelétrica, a energia termelétrica proporciona um grau de confiabilidade maior, o que pode tornar a sua instalação interessante, mesmo quando o custo unitário da sua energia elétrica é maior do que o da energia de origem hidrelétrica.

O uso das duas tecnologias também pode advir do fato de o custo das hidrelétricas ser heterogêneo. O custo unitário da energia elétrica de uma hidrelétrica depende do sítio hidrológico em que é instalada, portanto é possível que um sistema elétrico tenha algumas hidrelétricas que podem proporcionar energia a um custo unitário menor do que termelétricas e outras que apresentam um custo maior do que as termelétricas. É possível ainda que essa relação mude ao longo do tempo, seja devido à expansão da rede de transmissão, que reduz o custo marginal de se conectar certas hidrelétricas à rede de transmissão, seja devido à alteração do custo dos combustíveis, ou devido a mudanças nas tecnologias disponíveis.

2.2O modelo

Para se estabelecer um mecanismo de mercado que induza os agentes a utilizar esses dois tipos de recursos naturais de forma apropriada é necessário definir qual seria a configuração ótima e as regras para a operação ótima. O modelo desenvolvido nessa seção busca identificar a configuração do parque gerador e as regras de operação que satisfaçam a demanda por energia elétrica ao menor custo social, dado o parque hidrelétrico existente. Supõe-se que a demanda é inelástica ao preço. Deseja-se definir qual é a capacidade instalada de cada tipo de termelétrica que deve ser incorporada ao parque gerador hidrelétrico existente e como determinar quais usinas despachar em cada período (ano).

Na literatura o problema de otimização de parques geradores hidrotérmicos geralmente é tratado com modelos de programação dinâmica estocástica, com algumas modificações para evitar a “maldição da dimensionalidade” (isto é, a incapacidade de processar todos as possibilidades possíveis devido ao crescimento exponencial de estados possíveis nos períodos futuros). Essa é a metodologia adotada para otimizar o parque gerador brasileiro (Terry, Pereira, Araripe Neto, Silva e Sales, 1986; Maceira, 1993; Mello, Pereira, Granville, Lima e Alvarenga, 1997). Esses modelos proporcionam bons algoritmos para a operação dos parques geradores, mas não contribuem muito para o entendimento analítico do problema.

O modelo desenvolvido nesse ensaio visa representar a configuração e operação ótima de um parque hidrotérmico de forma simples captando os principais *tradeoffs* envolvidos. Para isso, o problema de otimização do parque gerador é reduzido a um problema estático. Essa simplificação do problema é obtido representando a operação do parque gerador hidrelétrico como um processo de decisão de Markov. Essa estratégia de simplificar o problema dinâmico a um estático também é adotada por Drouin, Gautier, Lamond e Lang (1996), com uma abordagem diferente. Eles também representam o processo decisório das hidrelétricas como uma cadeia de Markov, mas utilizam uma função de custo de oportunidade da água contínua em segmentos (*piecewise continuous*) enquanto nesse ensaio utiliza-se o conceito de energia assegurada. Levin e Zahavi (1985) também apresentam um modelo hidrotérmico estático, porém no seu modelo o custo de oportunidade da água é exógeno, não proporcionando uma formulação completa do problema.

A otimização do investimento e da operação de um sistema elétrico necessariamente atende três princípios básicos. Destaca-se esses três princípios básicos porque eles proporcionam os conceitos-chaves para avaliar se uma determinada arquitetura de mercado apresenta condições de promover a otimização do setor elétrico através da concorrência. Nessa seção identifica-se esses três princípios, que na seção 2.2.3 são traduzidos em regras de otimização e na seção 2.4.2 são empregadas para auxiliar na elaboração de uma proposta de arquitetura de mercado para o setor elétrico brasileiro.

O primeiro é o princípio marginalista: a operação deve ser balizada pelo custo marginal. Mais especificamente, o despacho deve ser baseado no custo marginal somente, ignorando-se os custos fixos e irreversíveis.

PRINCÍPIO 1

A operação deve sempre buscar minimizar o custo marginal.

O segundo princípio aplica-se à decisão de investimento. As decisões de investimento devem ser feitas a partir da análise de custo e benefício marginais sociais, isto é, da perspectiva do sistema como um todo. Esse requisito é importante devido à presença de complementaridades na geração.

PRINCÍPIO 2

O investimento deve ser baseado no benefício marginal líquido proporcionado ao sistema elétrico.

O terceiro princípio é o de que a operação deve ser sustentável no tempo. A relevância desse princípio para o setor elétrico brasileiro está no importante papel desempenhado pelos reservatórios na regularização da energia afluenta do parque hidrelétrico. A concavidade da função utilidade por eletricidade, somada à volatilidade do regime fluvial e à enorme participação de hidrelétricas no parque gerador brasileiro, fazem com que a regularização da energia afluenta seja um dos componentes fundamentais na minimização do custo de geração de energia elétrica no Brasil. Se a geração de origem hidrelétrica for muito volátil, o sistema acarretará mais custos devido a déficits de energia ou devido à instalação de termelétricas adicionais para complementar a energia hidrelétrica.

PRINCÍPIO 3

A operação deve ser sustentável ao longo do tempo.

2.2.1 Otimização do parque gerador termelétrico

O parque gerador termelétrico dispõe de J tipos de usinas, cada um especializado na geração de energia elétrica numa faixa de fator capacidade (taxa de operação do equipamento).⁴² Cada tipo de termelétrica j pode ser descrito pela função custo $C_j(q_j)$:

$$C_j(q_j) = f_j(\bar{q}_j) + c_j q_j \quad \text{com } q_j \leq \bar{q}_j \quad (2.1)$$

na qual f_j representa o custo fixo, c_j , o custo marginal e q_j representa a quantidade gerada e $\bar{q}_j$ a capacidade instalada. A tecnologia termelétrica agregada é apresentada na figura 2.4(a), na qual o eixo horizontal representa o fator capacidade, s , com que a usina é operada, e o eixo vertical representa o custo total. A linha c_d na figura representa o custo de déficit. Quando o parque gerador não consegue suprir toda a demanda supõe-se que o custo para o consumidor é $c_d d$, sendo que d representa a magnitude do déficit.

Figura 2.4(a)

É conveniente enumerar as termelétricas em ordem crescente de custo fixo, como ilustrado na figura 2.4(a). Define-se o intervalo de fator capacidade ótima de cada tipo de usina j , (s_j, s_{j+1}) , como sendo o segmento de fator capacidade no qual o

⁴² Nesse ensaio a otimização de um sistema termelétrico é apresentada de forma abreviada; a seção 3.1 da dissertação de Hochstetler (1998) contém uma apresentação completa do modelo para um sistema termelétrico. A mesma abordagem para parques geradores térmicos é adotada por Anderson (1972); Levin e Zahavi (1984); Oren, Smith e Wilson (1985) e Gross e Finlay (1986).

determinado tipo de usina gera eletricidade ao menor custo médio, representado pela linha em negrito na figura 2.4(a) ou em forma de equação:

$$\text{Min}[f_j(\bar{q}_j) + c_j s \bar{q}_j], \forall s \quad (2.2)$$

Dado o fato de que a tecnologia apresenta retornos crescentes de escala, o Princípio 3 implica que a configuração ótima precisa ser determinada a partir do custo médio das usinas.

A operação ótima de um parque gerador termelétrico deve seguir a ordem de despacho de menor custo marginal (Princípio 1). A operação ótima significa que a usina tipo J (a de menor custo variável e maior custo fixo) será despachada quase constantemente, e a usina tipo 1 (a de maior custo variável e menor custo fixo) será a despachada somente quando todas as outras usinas estiverem operando com plena capacidade.

$$q_{js} = \begin{cases} \bar{q}_j, & \text{se } s < s_j \\ \Delta(s), & \text{se } s_j \leq s < s_{j+1} \\ 0, & \text{se } s \geq s_{j+1} \end{cases} \quad (2.3)$$

A configuração ótima depende do comportamento da demanda ao longo de seu ciclo completo (geralmente um ano). A potência máxima instalada de cada tipo de usina j , $\bar{q}_j$, deve ser igual à potência máxima requerida para atender o segmento de fator carga da função de duração da demanda,⁴³ $\Delta(s)$, correspondente ao segmento de fator capacidade ótimo da usina tipo j , (s_{j-1}, s_j) , menos a potência instalada das usinas de custo marginal menor (as usinas $j+1, j+2, \dots, J$).

$$\begin{aligned} \bar{q}_J &= \Delta(s_J) \\ \bar{q}_{J-1} &= \Delta(s_{J-1}) - \bar{q}_J \\ &\vdots \\ \bar{q}_2 &= \Delta(s_2) - \sum_{j=3}^J \bar{q}_j \\ \bar{q}_1 &= \Delta(s_1) - \sum_{j=2}^J \bar{q}_j \end{aligned} \quad (2.4)$$

⁴³ A função de duração da demanda anual indica a fração do tempo em que a demanda é menor ou igual a um dado nível de potência ao longo de um ano.

2.2.2 A otimização do parque gerador hidrelétrico

Um dos principais desafios na operação das hidrelétricas é a aplicação do Princípio 3. Como sustentar a capacidade de geração hidrelétrica ao longo do tempo? A forma utilizada para balizar o uso da energia afluyente nesse modelo é o uso do conceito de energia assegurada do sistema, q_f . O que a energia assegurada significa é que o parque gerador sempre busca gerar esse nível de energia elétrica anualmente. A quantidade de energia elétrica de origem hidrelétrica, q_t , somente deriva da energia assegurada quando limitada pela capacidade de armazenamento do sistema. Somente gera-se menos energia hidrelétrica quando o volume de energia afluyente armazenada nos reservatórios é zero. Somente gera-se mais energia hidrelétrica quando o volume de energia armazenada atinge o limite máximo dos reservatórios, $\bar{v}$.

$$q_t = \begin{cases} q < q_f, & v_t = 0 \\ q_f, & 0 \leq v_t \leq \bar{v} \\ q > q_f, & v_t = \bar{v} \end{cases} \quad (2.5)$$

Num dado momento, t , a capacidade de geração hidrelétrica depende do volume de energia armazenada nos seus reservatórios, v_{t-1} , da energia afluyente natural da(s) usina(s), a_t , e do volume de energia armazenada que se deseja manter para o próximo período, v_t :

$$q_t = v_{t-1} + a_t - v_t. \quad (2.6a)$$

Seria trivial definir a energia assegurada do sistema se a energia afluyente fosse constante, mas esse não é o caso. A energia afluyente é um número aleatório. A partir das séries históricas pode-se constituir a função densidade da energia afluyente, f_a , e a função distribuição F_a :

$$f_a(a_t) = \Pr[a = a_t] \quad (2.7a)$$

$$F_a(a_t) = \Pr[a \leq a_t] \quad (2.7b)$$

Para o estudo da configuração ótima do sistema elétrico é conveniente trabalhar-se com intervalos de um ano. Assim, pode-se abstrair a sazonalidade hidrológica que ocorre ao longo do ciclo anual. Supõe-se que as condições hidrológicas anuais são independentes.

O nível de energia assegurada precisa ser sustentável ao longo do tempo, portanto q_f precisa ser tal que permita armazenar energia afluyente de períodos de condições de hidrologia favorável para sustentar o mesmo nível de geração em períodos de condições de hidrologia adversa (períodos secos). A determinação do nível de energia assegurada envolve um *tradeoff*: quanto maior for o nível de energia assegurada, maior será o risco de déficit. Portanto, a otimização do parque gerador precisa considerar esses dois fatores ao definir o nível ótimo de energia assegurada.

Para decidir o nível de energia assegurada ótimo pode-se modelar o sistema hidrelétrico como uma Cadeia de Markov, na qual a variável de estado é o volume agregado de energia armazenada, v_t :

$$v_t = v_{t-1} + a_t - q_f \quad (2.6b)$$

e a função de transição do estado v_{t-1} para v_t é:

$$f_v(v_t | v_{t-1}, q_f) = f_a(q_f + v_t - v_{t-1}). \quad (2.8)$$

Como os reservatórios apresentam um volume de armazenagem limitado é necessário modificar a função de transição para considerar os casos-limite. Seja o volume máximo dos reservatórios denotado por $\bar{v}$. Quando a energia afluyente natural exceder a quantidade gerada no período mais o volume disponível remanescente do reservatório, o excedente será vertido e o estado do reservatório será limitado a $\bar{v}$. De forma semelhante, se a energia afluyente natural for menor do que a energia assegurada e o volume armazenado não for suficiente para suprir a diferença, a geração total no período terá que ser limitada ao nível que leva o volume do reservatório a zero. A função de transição para 1, 2, ..., n períodos a frente é:

$$f_v(v_{t+1} | v_t, q_f) = \begin{cases} v_{t+1} = 0, & F_a(q_f + v_{t+1} - v_t) \\ 0 < v_{t+1} < \bar{v}, & f_a(q_f + v_{t+1} - v_t) \\ v_{t+1} = \bar{v}, & 1 - F_a(q_f + v_{t+1} - v_t) \end{cases} \quad (2.9a)$$

$$f_v(v_{t+2} | v_t, q_f) = \begin{cases} v_{t+2} = 0, & \int_0^{\bar{v}} f_v(v_{t+1} | v_t, q_f) F_a(q_f + v_{t+2} - v_{t+1}) dv_{t+1} \\ 0 < v_{t+2} < \bar{v}, & \int_0^{\bar{v}} f_v(v_{t+1} | v_t, q_f) f_a(q_f + v_{t+2} - v_{t+1}) dv_{t+1} \\ v_{t+2} = \bar{v}, & \int_0^{\bar{v}} f_v(v_{t+1} | v_t, q_f) [1 - F_a(q_f + v_{t+2} - v_{t+1})] dv_{t+1} \end{cases} \quad (2.9b)$$

$$\vdots$$

$$f_v(v_{t+n} | v_t, q_f) = \begin{cases} v_{t+n} = 0, & \int_0^{\bar{v}} f_v(v_{t+n-1} | v_t, q_f) F_a(q_f + v_{t+n} - v_{t+n-1}) dv_{t+n-1} \\ 0 < v_{t+n} < \bar{v}, & \int_0^{\bar{v}} f_v(v_{t+n-1} | v_t, q_f) f_a(q_f + v_{t+n} - v_{t+n-1}) dv_{t+n-1} \\ v_{t+n} = \bar{v}, & \int_0^{\bar{v}} f_v(v_{t+n-1} | v_t, q_f) [1 - F_a(q_f + v_{t+n} - v_{t+n-1})] dv_{t+n-1} \end{cases} \quad (2.9c)$$

Esse processo estocástico é uma cadeia de Markov ergódica irreduzível, pois apresenta:

- um espaço de estados limitado, $0 < v_i < \bar{v}$;
- uma única classe, pois todos os estados se comunicam, $v_i \leftrightarrow v_j, \forall i, j$, ou seja, para qualquer estado i um outro estado j qualquer pode ser alcançado num período de tempo finito.

Cadeias de Markov ergódicas e irreduzíveis convergem para uma distribuição estacionária⁴⁴, $f(v | q_f)$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_v(v_{t+n} | v_t, q_f) = f(v_{t+n} | q_f) \quad (2.10)$$

Isso é importante para se determinar o nível ótimo de energia assegurada, pois proporciona uma função densidade dos estados possíveis para os reservatórios do sistema independentemente do estado inicial.

A quantidade de energia gerada superior à energia assegurada é denominada energia secundária. Essa é a energia excedente (que excede a energia assegurada) ofertada ao mercado somente em períodos de condições hidrológicas favoráveis quando os reservatórios estão cheios.

Essa regra operacional permite que a função de transição da Cadeia de Markov para os estados dos reservatórios seja reinterpretada como uma função de transição para os estados de energia gerada q_t :

⁴⁴ Esse resultado é bastante conhecido na literatura de Cadeias de Markov. Para esse trabalho consultou-se Ross (2000).

$$f_q(q | q_f) = \begin{cases} q_t < q_f, & F(0 | q_f) \\ q_t = q_f, & \int_0^{\bar{v}} f(v | q_f) dv \\ q_t > q_f, & 1 - F(\bar{v} | q_f) \end{cases} \quad (2.11)$$

Dessa função densidade pode-se obter a configuração ótima para o sistema hidrelétrico dado o custo de déficit, o preço da energia assegurada e o preço da energia secundária, se houver um mercado por esta energia:

$$\sup_{q_f} \left\{ p_f q_f \int_0^{\bar{v}} f(v | q_f) dv + p_s E(q_s | q_f) [1 - F(\bar{v} | q_f)] - c_d E(d | q_f) F(0 | q_f) \right\} \quad (2.12)$$

no qual, a quantidade esperada de energia secundária disponível é:

$$E(q_s | q_f) = \int_{q_f + \bar{v} - E(v | q_f)}^{\infty} a f_a(a) da \quad (2.13)$$

e a magnitude do déficit esperado é:

$$E(d | q_f) = \int_0^{q_f - E(v | q_f)} a f_a(a) da \quad (2.14)$$

dado que o volume armazenado esperado é:

$$E(v | q_f) = \int_0^{\bar{v}} v f(v | q_f) dv \quad (2.15)$$

2.2.3 A otimização do parque hidrotérmico

Como o custo marginal das hidrelétricas é nulo, o Princípio 1 significa que as hidrelétricas sempre terão precedência sobre as termelétricas na operação. Assim, o despacho e a configuração do parque termelétrico devem levar em conta a disponibilidade de energia hidrelétrica. Isso é realizado substituindo a função de duração de demanda, $\Delta(s)$, pela função de duração de demanda residual, $\Delta_r(s)$, isto é, a função de duração da demanda não atendida pela geração hidrelétrica.

Busca-se, portanto, minimizar o custo de geração anualizado de atender a demanda anual D , considerando que o parque gerador hidrelétrico existente opera com uma energia assegurada de q_f , e que J tipos de termelétricas podem ser instaladas, cada qual com um custo fixo, f_j , e um custo marginal, c_j . As variáveis de controle são a potência instalada agregada de cada tipo de termelétrica, $\bar{q}_j$, e o fator capacidade, s ,

com o qual cada tipo de usina é operada, q_{js} , de forma que a quantidade total gerada ao longo de um ano pelas usinas do tipo j seja q_j .

$$\min_{\bar{q}_1, \dots, \bar{q}_J, q_{1s}, \dots, q_{Js}} \sum_{j=1}^J (f_j \bar{q}_j + c_j \int q_{js} ds) \quad (2.16)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j=1}^J q_{js} = \Delta_r(s), \quad \forall s \quad (\lambda_s) \quad (2.17)$$

$$q_{js} \leq \bar{q}_j, \quad \forall j, \forall s \quad (\mu_{js}) \quad (2.18)$$

$$\Delta_r(s) = D - \int_0^\infty f_q(q | q_f) dq \quad (2.19)$$

$$q_{js} \geq 0, \quad \forall j, \forall s \quad (2.20)$$

$$\bar{q}_j \geq 0, \quad \forall j \quad (2.21)$$

A figura 2.4 ilustra o processo de otimização. O primeiro passo é achar a função de duração da demanda residual, $\Delta_r(s)$. Essa função é obtida através da diferença entre a função distribuição da geração hidrelétrica, $F_q(q|q_f)$, e a demanda anual (representada pelo quadrado D , no gráfico do lado direito inferior). A função de duração da demanda residual é reproduzida no gráfico inferior do lado esquerdo, com a inversão dos eixos e transformando-se as unidades do eixo vertical de quantidade de energia gerada no período para unidades de potência instalada (de MWh/ano para MW, ou seja dividindo as unidades por 8760, que é o número de horas num ano). No gráfico superior identificam-se os segmentos de fator capacidade em que cada tipo de termelétrica especializa-se, isto é, o fator capacidade no qual a usina opera com o menor custo médio, denotado pela linha em negrito. Alinhando os segmentos de fator capacidade em que cada tipo de usina especializa-se com a função de duração da demanda líquida acha-se a potência instalada ótima de cada tipo de usina no eixo vertical.

Figura 2.4

A configuração ótima do parque termelétrico para o nível de energia assegurada q_f é:

$$\begin{aligned}
 \bar{q}_J &= \Delta_r(s_J) \\
 \bar{q}_{J-1} &= \Delta_r(s_{J-1}) - \bar{q}_J \\
 &\vdots \\
 \bar{q}_2 &= \Delta_r(s_2) - \sum_{j=3}^J \bar{q}_j \\
 \bar{q}_1 &= \Delta_r(s_1) - \sum_{j=2}^J \bar{q}_j
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

e a operação das termelétricas é otimizada quando cada tipo de usina é despachada no seu respectivo intervalo de fator capacidade de especialização e inferiores:

$$q_{js} = \begin{cases} \bar{q}_j, & \text{se } s < s_j \\ \Delta_r(s), & \text{se } s_j \leq s < s_{j+1} \\ 0, & \text{se } s \geq s_{j+1} \end{cases}, \forall j \tag{2.23}$$

Note que a diferença entre as equações 2.22 e 2.4 e entre as equações 2.23 e 2.3 é a substituição da função de duração de demanda, $\Delta(s)$, pela função de duração de demanda residual, $\Delta_r(s)$.

No contexto deste modelo, o Princípio 1 apresentado no início dessa seção é satisfeito quando segue-se a seguinte regra de otimização:

REGRA DE OTIMIZAÇÃO 1

A operação ótima das termelétricas é obtida quando a quantia de energia elétrica gerada anualmente por cada tipo de usina j é q_{js} :

$$q_{js} = \begin{cases} \bar{q}_j, & \text{se } s < s_j \\ \Delta_r(s), & \text{se } s_j \leq s < s_{j+1} \\ 0, & \text{se } s \geq s_{j+1} \end{cases}$$

no qual $\Delta_r(s)$ representa a função de duração da demanda residual:

$$\Delta_r(s) = D - \int_0^{\infty} f_q(q | q_f) dq$$

E a observância do Princípio 2 implica outra regra de otimização:

REGRA DE OTIMIZAÇÃO 2

A expansão do parque gerador termelétrico deve buscar instalar o tipo de usina especializada no segmento em que o fator capacidade da função de duração da demanda anual esperada excede a potência instalada atual do respectivo tipo de usina, de forma que a potência instalada de cada tipo de usina j seja:

$$\begin{aligned} \bar{q}_J &= \Delta_r(s_J) \\ \bar{q}_{J-1} &= \Delta_r(s_{J-1}) - \bar{q}_J \\ &\vdots \\ \bar{q}_2 &= \Delta_r(s_2) - \sum_{j=3}^J \bar{q}_j \\ \bar{q}_1 &= \Delta_r(s_1) - \sum_{j=2}^J \bar{q}_j \end{aligned}$$

nos quais $\Delta_r(s)$ representa a função de duração da demanda residual:

$$\Delta_r(s) = D - \int_0^{\infty} f_q(q | q_f) dq$$

Resta definir o nível de energia assegurada. Havendo termelétricas para complementar a geração hidrelétrica, a probabilidade de déficits pode ser reduzida com a instalação de termelétricas flexíveis (do tipo $j=1$ e adjacentes) e a energia secundária pode ser melhor aproveitada, pois pode substituir a geração das termelétricas de base (do tipo $j=J$ e adjacentes) que apresentam um custo marginal maior que as hidrelétricas.

Para achar o nível ótimo de energia assegurada, endogeniza-se a configuração termelétrica ótima para a função distribuição de geração obtida para cada nível de energia assegurada. A equação 2.12 indica o nível de energia assegurada ótimo para um parque gerador exclusivamente hidrelétrico, uma vez que a complementação por termelétricas passa a ser:

$$\sup_{q_f} \left\{ \begin{aligned} & p_f q_f \int_0^{\bar{v}} f(v | q_f) dv \\ & + p_s \int_{D+\bar{v}-E(v|q_f)}^{\infty} af_a(a) \\ & + (p_f - c_J) \int_{s_J D+\bar{v}-E(v|q_f)}^{D+\bar{v}-E(v|q_f)} af_a(a) da + \dots + (p_f - c_{J-i}) \int_{q_f}^{s_{i+1} D+\bar{v}-E(v|q_f)} af_a(a) da \\ & - c_d \int_0^{s_1 D-E(v|q_f)} af_a(a) da - c_1 \int_{s_1 D-E(v|q_f)}^{s_2 D-E(v|q_f)} af_a(a) da - \dots - c_j \int_{s_j D-E(v|q_f)}^{q_f} af_a(a) da \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

no qual $s_i D \leq q_f \leq s_{i+1} D$.

Achado o nível de energia assegurada ótimo, satisfaz-se o Princípio 3, que implica, nesse modelo, a seguinte regra de otimização:

REGRA DE OTIMIZAÇÃO 3

O despacho das hidrelétricas deve ser regularizado.

$$q_t = \begin{cases} v_{t-1} + a_t \leq q_f, & \text{se } v_t = 0 \\ q_f, & \text{se } 0 < v_t < \bar{v} \\ a_t + v_{t-1} - \bar{v} \geq q_f, & \text{se } v_t = \bar{v} \end{cases}$$

no qual q_f é:

$$\sup_{q_f} \left\{ \begin{aligned} & p_f q_f \int_0^{\bar{v}} f(v | q_f) dv \\ & + p_s \int_{D+\bar{v}-E(v|q_f)}^{\infty} af_a(a) \\ & + (p_f - c_f) \int_{s_j D+\bar{v}-E(v|q_f)}^{D+\bar{v}-E(v|q_f)} af_a(a) da \\ & \vdots \\ & + (p_f - c_{j-i}) \int_{q_f}^{s_{i+1} D+\bar{v}-E(v|q_f)} af_a(a) da \\ & - c_d \int_0^{s_1 D-E(v|q_f)} af_a(a) da \\ & - c_1 \int_{s_1 D-E(v|q_f)}^{s_2 D-E(v|q_f)} af_a(a) da \\ & \vdots \\ & - c_j \int_{s_j D-E(v|q_f)}^{q_f} af_a(a) da \end{aligned} \right\}$$

e no qual $s_i D \leq q_f \leq s_{i+1} D$.

2.3 Simulações

Utilizando o modelo elaborado na seção 2.2, realiza-se simulações baseadas em fatos estilizados do sistema elétrico brasileiro, com o intuito de ilustrar a aplicação do modelo. As simulações partem do pressuposto de que há um parque hidrelétrico existente e que deseja-se achar a configuração ótima para o parque gerador termelétrico necessário para atender uma determinada demanda. Supõe-se que há dois tipos de termelétricas: flexíveis e de base. As usinas flexíveis são as do tipo 1, no modelo anteriormente apresentado. Elas são as que apresentam um custo variável alto e um custo fixo baixo em relação às usinas de base. As usinas de base correspondem ao tipo J no modelo. Nessa seção simulações para diferentes níveis de energia assegurada são comparadas com o objetivo de determinar-se o nível de energia assegurada no qual as

hidrelétricas são operadas de forma ótima para diferentes níveis de demanda e para outra função de distribuição da energia afluyente natural. As hipóteses subjacentes das simulações são apresentadas com mais detalhe a seguir.

2.3.1 Hipóteses subjacentes

Como os dados de energia afluyente natural no Brasil não eram disponibilizados ao público no período em que esse ensaio foi elaborado, foi necessário supor uma distribuição para a energia afluyente natural. A figura 2.5(b) apresenta o gráfico da função distribuição utilizada nas simulações a seguir. Ela é derivada da função densidade apresentada na figura 2.5(a). Esta função densidade foi escolhida por apresentar as mesmas características que a energia afluyente natural, identificadas na seção 2.1.

Figura 2.5(a): Função densidade da energia afluyente natural

Figura 2.5(b): Função distribuição da energia afluyente natural

O eixo horizontal nos gráficos 2.5(a) e (b) representa a quantidade de energia elétrica gerada pelo parque gerador hidrelétrico no decorrer de um ano (medido em

TWh/ano) e a vertical representa a probabilidade de ocorrência. A função densidade representa a probabilidade de ocorrência do respectivo cenário hidrológico. Para incorporar as características do regime fluvial brasileiro, identificadas na seção 2.1, a função densidade é representada por uma distribuição Beta (2,5; 2) deslocada à direita e redimensionada. Essa função é assimétrica, com a cauda alongada à direita, como sugerem os dados apresentados na figura 2.1. A função é deslocada 150 TWh/ano para a direita, o que significa que a energia afluente natural nunca cai abaixo de um quarto do seu nível máximo, o que está em conformidade com os dados apresentados na figura 2.1. A função é redimensionada para abranger de 150 a 600 TWh/ano, de forma que a média é 349,5 TWh/ano, um pouco acima dos 335,6 TWh de geração hidrelétrica no Brasil em 2000.⁴⁵ Optou-se por um nível um pouco acima que o atual para realizar uma análise prospectiva considerando a entrada de novas hidrelétricas já em construção. A função distribuição é a função de probabilidade acumulativa da função densidade.

Figura 2.6: Função custo agregado da tecnologia termelétrica

A demanda anual suposta nas simulações é de 400 TWh, um pouco acima dos 360 TWh registrados em 2000.⁴⁶ Supõe-se que a potência instalada do parque gerador hidrelétrico é suficiente para atender a demanda de ponta (a potência máxima demandada). O volume máximo de energia armazenada que os reservatórios comportam é 50 TWh, o que significa que no pior cenário hidrológico o sistema atenderia metade da demanda anual se os reservatórios estivessem cheios no início do

⁴⁵ ONS (2001).

⁴⁶ ONS (2001).

período. O custo de déficit adotado é R\$ 684/MWh.⁴⁷ Supõe-se que as termelétricas apresentam um custo fixo anualizado de R\$ 185.000/MW e um custo variável de R\$ 70/MWh; e que as termelétricas de base apresentam um custo fixo anualizado maior, R\$ 278.000/MW, mas um custo variável menor, R\$ 40/MWh.⁴⁸ A função custo agregada da tecnologia termelétrica é apresentada na figura 2.6. O eixo horizontal representa o fator capacidade da usina e o eixo vertical, o custo total anual por MW em reais.

Supõe-se que os custos associados às hidrelétricas são independentes do nível de geração; em outras palavras, as hidrelétricas apresentam somente custos fixos. Sendo assim, seus custos são ignorados nas simulações, sendo considerados somente os custos associados à geração termelétrica e aos déficits de energia. Os déficits considerados nas simulações são decorrentes da falta de energia armazenada nos reservatórios das hidrelétricas. Déficits decorrentes de contingências não são considerados no modelo.

2.3.2 Os resultados

As simulações indicam que a distribuição da função de transição converge rapidamente para a distribuição estacionária. Simulações com uma demanda de 400 TWh/ano indicam que a distribuição dos estados do reservatório na quarta iteração difere menos de 6% da distribuição estacionária.⁴⁹ A distribuição estacionária é alcançada em menos de 30 iterações.

Dada a distribuição da energia afluyente natural, o nível de energia assegurada em que as hidrelétricas são operadas e a magnitude da demanda, o modelo determina a configuração ótima para o sistema termelétrico (a potência instalada e a quantidade de

⁴⁷ Esse é o preço de déficit atualmente utilizado pelo ONS no planejamento da operação do sistema, conforme ONS(2000).

⁴⁸ O custo anualizado supõe um custo de instalação de \$400/kW e \$600/kW para as usinas térmicas flexível e de base, respectivamente. O preço em reais supõe um câmbio de R\$2,50 por dólar. O preço anualizado é calculado supondo-se uma taxa de juros anual de 15%, uma depreciação completa do ativo em 20 anos, e uma defasagem de um ano, em média, entre os desembolsos e a entrada em operação da usina.

⁴⁹ A variação percentual das distribuições é calculada somando-se a variação percentual (em termos absolutos) da probabilidade de ocorrência de cada um dos 50 estados possíveis nas duas distribuições:
$$\sum_{v_{t+5}=0}^{\bar{v}} \frac{\|f_v(v_{t+5}|v_t, q_f) - f_v(v_{t+5}|q_f)\|}{f_v(v_{t+5}|q_f)}.$$

energia que espera-se gerar com cada tipo de termelétrica) e a probabilidade e magnitude esperadas de déficits de energia, a partir dos quais é calculado o custo total.

Os resultados das simulações resumidos na tabela 2.1 são explicados nos próximos parágrafos. Foram realizadas simulações para diversos níveis de demanda, para um parque gerador exclusivamente hidrelétrico, para diferentes distribuições de energia afluyente natural e operando com diversos níveis de energia assegurada. O nível de energia assegurada ótimo para cada nível de demanda é assinalado com um asterisco. As primeiras três colunas do lado esquerdo da tabela apresentam os parâmetros utilizados em cada simulação. A primeira coluna apresenta a função de distribuição utilizada para representar a energia afluyente natural, a segunda coluna mostra a demanda anual e a terceira coluna, o nível de energia assegurada utilizado para regularizar a geração hidrelétrica. As demais colunas apresentam a configuração ótima indicada pelo modelo, dados os parâmetros de entrada.

Tabela 2.1: Sumário de simulações realizadas

DIST. DA ENERGIA AFLUYENTE NATURAL	DEMANDA (TWh/ano)	ENERGIA ASSEGURADA (TWh/ano)	DÉFICIT				TERMELÉTRICA DE BASE				TERMELÉTRICA FLEXÍVEL				CUSTO TOTAL (R\$ bilhões)
			máximo (GW)	prob. (%)	esperado (GWh/ano)	custo (R\$ milhões)	potência instalada (GW)	energia esperada (GWh/ano)	fator cap. (%)	custo (R\$ milhões)	potência instalada (GW)	energia esperada (GWh/ano)	fator cap. (%)	custo (R\$ milhões)	
Beta(2,5,5) entre 150-600	400	401*	28.5	64.1	153,855.0	67,475.2	-	-	-	-	-	-	-	-	67.5
	250	251*	11.4	6.5	77,650.9	3,345.3	-	-	-	-	-	-	-	-	3.3
	300	301*	17.1	22.4	105,758.0	16,180.3	-	-	-	-	-	-	-	-	16.2
	350	351*	22.8	43.2	131,239.0	38,783.2	-	-	-	-	-	-	-	-	38.8
	450	451*	34.2	81.3	172,997.0	96,251.2	-	-	-	-	-	-	-	-	96.3
	400	150	4.6	3.3	26,497.0	599.3	11.0	78,043.7	81.3	6,168.3	13.0	24,455.8	21.5	4,119.4	10.9
	400	218*	7.6	1.0	5,636.3	377.9	11.2	79,922.0	81.6	6,306.9	9.7	14,998.9	17.6	2,845.0	9.5
	400	250	9.4	3.3	64,584.4	1,478.3	11.6	83,715.8	82.1	6,585.6	7.5	11,792.4	17.9	2,219.3	10.3
	400	332	7.1	3.3	42,504.3	971.2	7.9	52,364.3	75.9	4,284.3	13.6	25,713.5	21.6	4,313.1	9.6
	400	350	6.6	3.4	39,206.3	900.2	8.2	58,592.7	81.4	4,628.6	13.7	26,144.5	21.8	4,364.4	9.9
	400	400	5.6	3.3	32,668.3	745.9	9.4	77,158.7	94.1	5,688.6	13.6	25,866.9	21.7	4,323.8	10.8
	250	220*	7.9	1.2	58,325.4	465.9	-	-	-	-	9.4	14,087.2	17.2	2,717.8	3.2
	300	220*	7.9	1.2	58,325.4	465.9	-	-	-	-	9.4	14,087.2	17.2	2,717.8	3.2
	350	218*	7.6	1.0	56,936.3	377.9	5.5	35,237.9	73.4	2,932.8	9.7	14,998.9	17.6	2,845.0	6.2
	450	332*	7.1	3.3	42,504.3	971.2	13.6	96,297.2	80.9	7,628.4	13.6	25,713.5	21.6	4,313.1	12.9
	500	332*	7.1	3.3	42,504.3	971.2	19.3	140,086.0	82.9	10,966.7	13.6	25,713.5	21.6	4,313.1	16.3
Beta(2,5,2) entre 100-550	400	338	11.0	3.4	71,109.8	1,633.9	7.2	47,810.6	75.9	3,911.8	16.1	31,102.5	22.1	5,154.9	10.7
	400	197*	11.0	1.3	80,781.4	725.9	10.4	73,719.4	81.0	5,836.7	12.9	22,149.8	19.6	3,936.9	10.5

Nível de energia assegurada

Aplicando o procedimento delineado no modelo apresentado anteriormente, conclui-se que o nível de energia assegurada ótimo para esse parque gerador para uma demanda de 400 TWh/ano é de 218 TWh/ano (linha 7), que corresponde a 62% da média da energia afluente natural. As funções densidade e de distribuição da geração hidrelétrica são apresentadas nas figuras 2.7(a) e (b). A adoção de um baixo nível de energia assegurada significa que está-se priorizando a manutenção dos reservatórios em níveis altos para prevenir déficits em cenários de hidrologia desfavorável. Esta forma de operação implica que freqüentemente se opte por suprir parte da demanda com geração termelétrica, mesmo quando haveria condições de atender à demanda somente com as hidrelétricas.

Figura 2.7(a): Função densidade da geração com $q_f = 218$ TWh/ano

Figura 2.7(b): Função distribuição da geração com $q_f = 218$ TWh/ano

Observa-se que, dependendo da demanda, o custo total é minimizado com diferentes níveis de energia assegurada. Note que para uma demanda de 400 TWh/ano, quando a energia assegurada é fixada em 332 TWh (linha 9), o custo total é muito

próximo do observado com o nível de 218 TWh/ano⁵⁰ (linha 7) e quando a demanda é maior (como para uma demanda de 450 ou 500 TWh/ano), o nível de energia assegurada ótimo passa a ser 332 TWh/ano (linhas 15 e 16). Quando a demanda é menor que 350 TWh/ano, a instalação de termelétricas de base passa a ser anti-econômicas e o nível de energia assegurada ótimo passa a ser 220 TWh/ano (linhas 12 e 13).

A razão pela qual o nível de energia assegurada varia conforme a demanda decorre do peso relativo da energia de origem hidrelétrica na produção total. Nesse exercício de estática comparativa, uma demanda maior implica uma participação hidrelétrica menor na geração total, o que dilui o peso do componente estocástico decorrente da variabilidade de energia afluyente natural, permitindo a adoção de um nível mais elevado de energia assegurada.

Comparar as configurações ótimas do parque gerador termelétrico para a demanda de 400 TWh/ano com a energia assegurada em 218 TWh/ano e 332 TWh/ano (linhas 7 e 9 da tabela 2.1, respectivamente) permite ilustrar bem o *tradeoff* existente entre o uso mais intensivo dos recursos hídricos e a confiabilidade do sistema. Operando com um nível de energia assegurada de 332 TWh/ano (95% da média da energia afluyente natural), o sistema reduz a participação de termelétricas de base e aumenta a participação das termelétricas flexíveis, em relação à operação com o nível de energia assegurada de 218 TWh/ano. Com o aumento do nível de energia assegurada, os reservatórios passam a operar num nível mais baixo em média, aumentando a probabilidade de déficit. Os déficits máximo e esperado nesse caso são menores porque a potência instalada agregada das termelétricas é maior na configuração com a energia assegurada mais elevada. Ao substituir termelétricas de base por termelétricas flexíveis, reduz-se o gasto em custos fixos, o que permite a instalação de mais potência. As funções densidade e de distribuição para o nível de

⁵⁰ É possível que para esse nível de demanda o sistema hidrotérmico apresente dois níveis de energia assegurada que minimizem o custo devido ao fato de que a função distribuição da geração apresenta partes côncavas e convexas, e da tecnologia térmica agregada apresentar vértices, pois é uma função contínua em segmentos (*piecewise continuous*). O algoritmo utilizado para buscar o nível de energia assegurada ótimo somente permite examinar incrementos de 1 TWh/ano, portanto não é possível explorar essa possibilidade nesse trabalho.

energia assegurada estabelecido em 332 TWh/ano são apresentados nas figuras 2.8(a) e (b).

Figura 2.8(a): Função densidade da geração com $q_f=332$ TWh/ano

Figura 2.8(b): Função distribuição da geração com $q_f=332$ TWh/ano

Parque gerador exclusivamente hidrelétrico

Num sistema elétrico formado somente por hidrelétricas, a determinação do nível ótimo de energia assegurada é trivial: a energia assegurada deve ser igualada à demanda esperada. Isso decorre do fato de que não há outra fonte para proporcionar energia quando ocorrer condições hidrológicas desfavoráveis. Não faz sentido reduzir a geração atual para necessidades futuras quando isso acarreta déficits no período atual.

Comparando o custo total do sistema exclusivamente hidrelétrico com o custo total quando empregam-se termelétricas para os mesmos níveis de demanda, verifica-se que há um ganho quando se utilizam as duas tecnologias. Isso decorre do fato de que as termelétricas aumentam o grau de confiabilidade do sistema, ao reduzir a probabilidade e magnitude de déficits, de modo que, para um mesmo nível de confiabilidade, é possível um aproveitamento mais intenso dos recursos hídricos do que num sistema hidrelétrico puro.

Energia afluyente natural com função distribuição alternativa

Simulações adotando uma função distribuição da energia afluyente com a cauda esquerda alongada, representada pela função Beta (2,5; 2) com $a_t \in [100,550]$, mostram que o custo do sistema é maior do que quando a função distribuição apresenta a cauda direita alongada. A distribuição Beta (2,5; 2) com $a_t \in [100,550]$ é a escolhida porque é uma imagem inversa da função distribuição utilizada nas demais simulações. O deslocamento do intervalo da função em 50 TWh para a esquerda é necessário para que a distribuição tenha a mesma energia média que a distribuição utilizada nas outras simulações.

Figura 2.9: Função densidade da energia afluyente natural com cauda esquerda alongada

A cauda alongada à esquerda significa que déficits mais profundos podem ocorrer relativamente à distribuição com a cauda alongada à direita. Isso significa que a configuração ótima sempre irá requerer mais potência instalada de termelétricas flexíveis ou um nível de déficit esperado maior, o que acarreta maiores custos do que num sistema elétrico no qual a energia afluyente natural apresenta uma distribuição com a cauda esquerda não alongada.

Em suma, as simulações demonstram que o modelo permite a identificação da configuração ótima do parque termelétrico, dado um parque hidrelétrico existente. O modelo também indica como o parque hidrelétrico deve ser operado para minimizar o custo, sem comprometer o suprimento futuro. A partir do arcabouço proporcionado por esse modelo pode-se examinar como deve-se estruturar o mercado de energia para obter

a configuração e a operação ótima num ambiente no qual os agentes tomam as decisões independentemente.

2.4 A arquitetura de mercado

Tradicionalmente a configuração e a operação do parque gerador são realizadas por um agente central. Com o comando e controle centralizado, a coordenação torna-se mais fácil do que num mercado em que as decisões são realizadas de forma descentralizada. Essa é a principal razão pela qual as empresas do setor elétrico foram verticalizadas ou estatizadas no passado. Essa “arquitetura” também é a forma que mais se aproxima dos modelos de otimização.

Em anos recentes, novas formas de organizar as atividades do setor elétrico via mercado têm sido experimentadas. Esses novos planos arquitetônicos tornaram-se possíveis graças a avanços tecnológicos que permitiram a redução da escala ótima das usinas de geração, ao desenvolvimento da informática e telemetria, e aos avanços na teoria de jogos e de leilões (especificamente através de artigos explorando mecanismos de mercado ótimos para o setor elétrico).

As novas formas organizacionais adotadas são específicas a cada sistema elétrico, mas há elementos em comum entre elas que nos permite classificá-las em dois grupos. Seguindo a classificação de Wilson (1999), as duas formas básicas pelas quais se pode introduzir a concorrência de mercado no setor elétrico são: introduzindo-se um mecanismo de mercado para ordenar o despacho centralizado sob o controle do operador do sistema (como foi adotado na Grã-Bretanha⁵¹, e Pensilvânia–Nova Jersey–Maryland) ou criando-se vários mercados pelos quais os próprios agentes comercializam as várias dimensões do suprimento de energia elétrica (como foi adotado na Califórnia, Austrália e Escandinávia). No primeiro caso, implementa-se um leilão, que funciona como um “mecanismo de revelação” do qual se inferem “preços-sombra” que orientam a otimização do sistema. O sucesso desse arranjo depende da qualidade dos dados de entrada e da técnica de otimização utilizados pelo operador do

⁵¹ Refere-se à arquitetura do mercado britânico entre 1989 e 1999.

sistema. A estrutura de incentivos proporcionada nesse caso depende quase que exclusivamente do leilão para se promover a concorrência e orientar a expansão do parque gerador. No segundo caso, os preços derivam-se das forças da oferta e demanda de mercado. O sucesso desse arranjo depende do estabelecimento de múltiplos mercados para incorporar todas as dimensões envolvidas na otimização do setor elétrico e da coordenação entre esses mercados (como, por exemplo, mercados a termo, de curto prazo, de “serviços de sistema” e de direitos financeiros sobre a transmissão). Em suma, numa arquitetura de mercado baseada num mecanismo centralizado, a coordenação é obtida mais facilmente, mas a estrutura de incentivos proporcionada tende a ser fraca; já numa arquitetura de mercado baseada em vários mercados descentralizados proporcionam uma estrutura de incentivos melhor, mas tende a apresentar distorções devido à coordenação imperfeita entre os mercados.

Uma das vantagens de se coordenar o setor elétrico via mercado é que ele proporciona uma estrutura de incentivos que induz os agentes a melhorarem a tecnologia existente, a aprimorarem as técnicas de otimização, e a se adaptarem mais rapidamente a novas condições (como, por exemplo, mudanças nos preços relativos de insumos, alterações na demanda de energia elétrica e inovações tecnológicas).

Das três áreas que poderiam ser beneficiadas pela concorrência de mercado, mencionadas no parágrafo anterior, destaca-se o aprimoramento das técnicas de otimização, por ser a área tradicionalmente menos exposta à concorrência de mercado. Não há uma metodologia consagrada para o planejamento e operação de sistemas hidrotérmicos (Zahed, 1987). Trata-se de um problema muito complexo, que vem sendo aprimorado ao longo do tempo e promete melhorar ainda mais. Apesar de o modelo da seção 2.2 apresentar o problema de forma estática, a otimização do sistema elétrico requer um esforço contínuo, pois as condições estão sempre se alterando. A demanda, por exemplo, não é constante no tempo, como suposto no modelo, mas está sempre se alterando tanto na sua magnitude como na sua estrutura (comportamento sazonal e regional). De semelhante forma, a função de distribuição da energia afluente não é conhecida, como é suposto no modelo, mas é inferida pelos dados históricos, que são constantemente atualizados. Além disso, a otimização do sistema elétrico é muito mais complexa na realidade do que o problema apresentado nesse modelo, por uma série de razões: (i) há restrições de transmissão, (ii) a operação de uma hidrelétrica

depende da forma como a(s) usina(s) hidrelétrica(s) a montante (rio acima) é (são) operada(s), (iii) a energia afluyente natural em bacias distintas apresenta um comportamento sazonal distinto, (iv) a energia afluyente natural apresenta auto-correlação temporal, etc. Assim sendo, a otimização de sistemas elétricos requer uma constante reavaliação, podendo ser constantemente aperfeiçoada. Num ambiente de concorrência, é possível que o processo de aperfeiçoamento das técnicas de otimização seja acelerado, proporcionando ganhos significativos para a sociedade.

Por outro lado, a coordenação do setor elétrico introduz novos desafios: externalidades e abuso de poder de mercado. Se a arquitetura de mercado resultar num descolamento entre os custos e benefícios sociais e privados, devido à ação de um agente privado, haverá externalidades. Externalidades levam a distorções dos incentivos dos agentes, prejudicando a otimização do sistema. Da mesma forma, se algum(ns) agente(s) abusar(em) do seu poder de mercado, isto é, se restringirem a oferta a fim de elevar o seu lucro, a otimização do sistema será prejudicada.

O desafio principal na definição de uma arquitetura para o setor elétrico é definir um mecanismo de mercado e um arranjo insitucional que incentivem os agentes a comportarem-se conforme o previsto no modelo apresentado, internalizando todas as externalidades, e que penalize o abuso de poder de mercado.

2.4.1 Antecedentes acadêmicos

Oligopólios e o exercício do poder de mercado

A literatura econômica apresenta uma rica herança de estudos da probabilidade de exercício do poder de mercado em condições oligopolísticas. Os resultados são inconclusivos para oligopólios. Dois modelos clássicos abordam a questão: o modelo de Cournot e o modelo de Bertrand. As previsões dos dois modelos são muito diferentes. No modelo de Cournot, as firmas definem as quantidades ofertadas e preço de equilíbrio é determinado pelo mercado. Esse modelo prevê uma redução da oferta (elevação do preço e redução da quantidade de equilíbrio) com relação ao equilíbrio sob concorrência perfeita. Já no modelo de Bertrand as firmas definem o preço, e a quantidade demanda é determinada pelo mercado. O equilíbrio previsto por esse modelo é igual ao previsto sob concorrência perfeita.

No caso de indústrias caracterizadas por restrições de capacidade, entretanto, a teoria é mais conclusiva. Kreps e Sheinkman (1983) demonstram que, num modelo de oligopólio na qual as empresas, numa primeira etapa, definem a sua capacidade e, numa segunda etapa, definem os preços aos quais vendem os seus produtos (como no modelo de Bertrand), obtém-se o resultado de Cournot. Davidson e Deneckere (1986) destacam que o resultado de Kreps e Sheinkman depende da regra de racionamento adotada para lidar com situações em que a demanda supera a capacidade de produção da firma de menor preço. Conforme a regra de racionamento adotada, o equilíbrio resultante tende a apresentar um preço inferior e uma quantidade superior aos previstos pelo modelo de Cournot. Contudo, o equilíbrio resultante tende a apresentar um preço superior e uma quantidade inferior aos previstos pelo modelo de Bertrand.

Klemperer e Meyer (1989) examinam o comportamento de um oligopólio que concorre definindo funções de oferta individuais (definindo a quantidade que estão dispostos a vender a cada preço) diante de uma demanda incerta. Nesse caso o resultado depende da inclinação das funções de oferta das firmas: se as funções de oferta se aproximarem de uma linha vertical, o equilíbrio resultante será próximo ao previsto pelo modelo de Cournot; e se as funções de oferta se aproximarem de uma linha horizontal, o equilíbrio resultante será próximo ao previsto pelo modelo de Bertrand. Os principais fatores determinantes da inclinação da função de oferta das firmas são o número de firmas, o grau de diferenciação do produto, a expectativa com relação à distribuição do componente aleatório da demanda, a inclinação da curva de custo marginal e a inclinação da demanda.

Esse arcabouço teórico possibilita a estimação do nível máximo de elevação de preços que pode ser esperado nos mercados de energia elétrica quando desregulamentados. Utilizando o conceito de Cournot-Nash, Borenstein e Bushnell (1999) examinam o potencial de abuso do poder de mercado no sistema elétrico da Califórnia, enquanto Wolfram (1999) examina o comportamento do setor elétrico britânico. Borenstein, Bushnell e Knittel (1999) argumentam a superioridade dessa forma de análise com relação ao procedimento tradicional, utilizado pelos órgãos de defesa da concorrência, que baseam-se principalmente em índices de concentração.

O conceito de Cournot-Nash também tem sido adotado para analisar a concorrência no setor elétrico brasileiro. Araújo e Zendron (2000) examinam a concorrência no mercado à vista considerando diferentes números de empresas de geração. Hochstetler (1999) utiliza o conceito de Cournot-Nash para examinar a concorrência no mercado de contratos bilaterais. Uma análise de estática comparativa é realizada com várias elasticidades de demanda para avaliar o efeito de cisões das empresas de geração estatais propostas no Relatório da Coopers & Lybrand *et alli* (1997); alterações do nível de contratação mínima; redução do preço médio esperado do mercado de curto prazo; e várias formas de expansão do parque gerador (expansão por novos agentes ou pelas empresas dominantes). Kelman, Barroso e Pereira (2001) também utilizam o conceito Cournot-Nash para avaliar a possibilidade do exercício do poder de mercado das empresas de geração do sistema elétrico do sudeste do Brasil, dado diferentes níveis de contratação utilizando um modelo dinâmico.

O exercício do poder de mercado em sistemas elétricos hidrotérmicos

Bushnell (1998), Crampes e Moreaux (2001), e Kelman, Barroso e Pereira (2001) ressaltam que em sistemas elétricos hidrotérmicos as empresas de geração hidrelétrica podem aumentar o seu poder de mercado agindo de forma estratégica: reduzindo a oferta nos períodos de ponta e de seca e aumentando a oferta nos períodos fora de ponta (de carga leve) e de chuva. Essa restrição estratégica da oferta por parte das hidrelétricas é mais lucrativa do que uma restrição uniforme por dois motivos: as hidrelétricas apresentam custos marginais inferiores aos das termelétricas e a produção das termelétricas é limitada pela sua potência instalada (e a energia elétrica não pode ser estocada). O exercício do poder de mercado geralmente resulta numa elevação do preço e numa redução das vendas. Para que o exercício do poder de mercado seja lucrativo é necessário que o efeito da elevação do preço mais que compense o efeito da queda nas vendas. A restrição estratégica acirra a elevação de preços e ameniza a redução das vendas. Nos períodos de ponta e secos, quando a capacidade ociosa das demais firmas é pequena ou nula, a contenção da geração por parte das hidrelétricas provoca uma elevação de preço maior do que nos demais períodos, porque a capacidade das demais empresas geradoras substituir a sua geração é muito limitada. Já a queda nas vendas dessas hidrelétricas nos períodos de ponta e secos é compensada por uma elevação das vendas nos períodos fora de ponta e de chuva. Essa elevação nas vendas é obtida substituindo a geração das termelétricas através de uma redução do preço para

um patamar inferior ao custo variável das termelétricas, o que torna a sua participação inviável. Assim, a estratégia de contenção de oferta é ainda mais lucrativa do que em condições normais.

Lino, Barroso, Pereira, Kelman e Fampa (2001) identificam outra forma de potencial abuso do poder de mercado em sistemas elétricos nos quais há hidrelétricas em série numa mesma bacia hidrográfica. Nesse caso, a operação de uma hidrelétrica afeta a operação de todas as hidrelétricas a jusante, ao alterar o fluxo de energia afluente natural na bacia hidrográfica. O artigo não examina o poder de mercado proporcionado pelo uso estratégico dessa interdependência, mas demonstra que, se a operação das hidrelétricas individuais fosse realizada de forma descentralizada via mercado, mesmo supondo concorrência perfeita o aproveitamento da energia afluente seria prejudicado, devido à falta de coordenação entre as usinas em série numa mesma bacia hidrográfica.

A mitigação do poder de mercado através do uso de mercados a termo

Allaz e Villa (1993) apresentam um modelo de Cournot com um mercado à vista e um mercado a termo. Eles demonstram que, havendo mercados a termo para todo o futuro (infinitos períodos à frente), o equilíbrio converge para o de um mercado de concorrência perfeita.

Powell (1993), Newberry (1998) e Green (1999) argumentam que o mercado de contratos torna o segmento de geração contestável à medida que permite que novos agentes fixem o preço de venda no momento da entrada, eliminando o risco de retaliação por parte das firmas de geração existentes. Isso explicaria por que o mercado de energia elétrica britânico tem conseguido conter o abuso do poder de mercado, apesar da elevada concentração do setor.

A contratação antecipada, embora se constitua através de contratos financeiros, também tende a mitigar o abuso do poder de mercado em sistemas hidrotérmicos. Simulações realizadas por Scott e Read (1996) para o sistema elétrico da Nova Zelândia, e por Kelman, Barroso e Pereira (2001), indicam que a elevação do nível de contratação (através de mercado a termo, mercado futuro ou de contratos bilaterais) tende a reduzir o nível de sobrepreço praticado no mercado.

Adequabilidade e sustentabilidade em mercados competitivos

Oren (2000) afirma que, num mercado competitivo, o nível de adequabilidade é determinado pelo nível de *hedge* contratado pelos consumidores e comercializadores de energia para lidar com a volatilidade do preço de energia elétrica no mercado à vista, e pelas empresas de geração hidrelétrica para lidar com o risco hidrológico. Esse *hedge* pode ser de natureza física (como contratos de energia a termo, por exemplo) ou de natureza financeira (como contratos de diferença e opções financeiras). Ele relata que, diante da inexperiência com mercados de energia elétrica, alguns especialistas recomendam que um grau de *hedging* físico seja obrigatório ou que a provisão de reservas mínimas seja obrigatória.

Conforme Baumol, Panzar e Willig (1982), em indústrias nas quais grande proporção dos custos são fixos e irreversíveis a arquitetura de mercado precisa assegurar a “sustentabilidade” da indústria, tornando não-lucrativa a entrada desnecessária e viabilizando a prática de preços iguais ao custo médio.

Joskow (2000) observa que os mercados de energia elétrica tendem a apresentar problemas quando a demanda aproxima-se da capacidade instalada, tanto na geração como na transmissão. Isso sugere que para garantir o bom funcionamento dos mercados de energia é necessário ter excesso de capacidade na transmissão e na geração. Esse sobreinvestimento requerido para assegurar o sucesso da coordenação via mercado é um dos custos desse arranjo institucional.

Arquitetura de mercado do setor elétrico brasileiro

A arquitetura de mercado atualmente adotada no Brasil não chega a promover a coordenação via mercado. Apesar de a arquitetura de mercado aproximar-se do sistema da Grã-Bretanha, a coordenação não chega a ser de mercado porque os preços da energia de origem hidrelétrica não são obtidos a partir de lances por parte das empresas. Os preços da energia de origem hidrelétrica são determinados pelo Operador Nacional do Sistema a partir de um algoritmo de otimização. Essa arquitetura de mercado permite a livre concorrência na expansão do parque gerador, enquanto mantém a operação sob controle centralizado. Isso facilita a coordenação hidrotérmica, mas coloca

dificuldades para se assegurar a adequabilidade do suprimento de energia elétrica, pois cria uma dicotomia entre o investimento e a operação.

O relatório da Coopers & Lybrand *et alli* (1997) é o documento básico que tem orientado as reformas no setor elétrico brasileiro, e continua a ser uma das melhores fontes para se conhecer a arquitetura de mercado do setor elétrico brasileiro. Uma apresentação mais concisa dos principais elementos do setor elétrico brasileiro é feita em Pereira e Roseblatt (2000) e Mendonça e Dahal (1999). O algoritmo de determinação do preço do mercado à vista (mercado do MAE) é explicado por Silva (2001). Alguns problemas enfrentados por essa arquitetura de mercado e sugestões para corrigi-las são expostos em Oliveira (1997), Sauer (2001), Anuatti Neto e Hochstetler (2001) e Comitê de Revitalização do Setor Elétrico (2002).

2.4.2 Os requisitos básicos que a arquitetura de mercado precisa satisfazer

Na seção 2.3 os três princípios fundamentais para o funcionamento eficiente de mercados são apresentados e traduzidos em regras de otimização específicas para um parque gerador hidrotérmico como o brasileiro. Dessas três regras de otimização pode-se extrair os requisitos básicos que a arquitetura do mercado do setor elétrico precisa satisfazer.

O requisito básico imposto pela Regra de Otimização 1 é que a operação das termelétricas seja subordinada à operação das hidrelétricas. Isso constitui um enorme desafio para o mercado, onde as decisões operacionais são feitas de forma descentralizada. A arquitetura de mercado precisa ser tal que a remuneração obtida pelos agentes, ao operarem da forma prevista pelo modelo, seja a mais rentável possível para os proprietários das termelétricas, considerando-se os riscos envolvidos.

A Regra de Otimização 2 requer que a escolha de tipo de termelétrica que os entrantes ou firmas em expansão forem instalar seja balizada pela função de duração da demanda residual e pela configuração do parque termelétrico atual. A arquitetura de mercado precisa proporcionar um grau de comprometimento suficiente para se viabilizar a instalação das termelétricas necessárias para se atender à demanda residual. Além disso, esse comprometimento deve ser estruturado de forma que o retorno esperado para o tipo de termelétrica mais adequado para atender o segmento da curva

de duração da demanda residual seja maior do que para qualquer outro tipo de termelétrica. Além disso, a arquitetura de mercado deve desincentivar o investimento quando a instalação de usinas torne-se desnecessária, para que não haja excesso de capacidade instalada.

Finalmente, a Regra de Otimização 3 requer que a geração hidrelétrica seja regularizada. Para isso, os proprietários devem definir o seu nível ótimo de energia assegurada, dadas as restrições impostas pela capacidade de armazenamento dos reservatórios. É necessário pois que a arquitetura de mercado proporcione uma estrutura de incentivos robusta, de modo a induzir os proprietários das hidrelétricas a se comprometerem a ofertar energia de forma relativamente constante.

Além desses requisitos, a coordenação via mercado requer a internalização de externalidades e a penalização de abusos de poder de mercado. Para se evitar as externalidades é necessário que o preço de mercado seja determinado levando-se em conta todos os elementos que afetam o bem-estar social. Já para evitar o abuso de poder de mercado é essencial que o mercado apresente um certo grau de contestabilidade.

Nos próximos parágrafos cada um desses requisitos é analisado de forma mais detalhada. A seguir apresenta-se uma arquitetura de mercado que atende aos requisitos aqui apresentados.

A regularização da geração hidrelétrica

Como o parque gerador hidrelétrico é dominante no sistema elétrico brasileiro, a arquitetura de mercado deve dar primazia à satisfação deste último requisito: induzir o parque gerador hidrelétrico a regularizar a sua oferta de energia elétrica ao longo do tempo. Para obter isso é necessário que os proprietários de hidrelétricas tenham expectativas de um retorno futuro que tornem atraente a decisão de armazenar a energia afluyente que poderia ser vendida hoje a um preço conhecido. Como o preço marginal das hidrelétricas é próximo de zero, as vendas sempre serão atraentes no período

corrente.⁵² Além disso, o que está por trás do Princípio 3 é a necessidade de um ambiente estável para viabilizar investimentos em termelétricas. Um parque hidrelétrico operado de forma irregular tornaria o ambiente extremamente arriscado para investimentos em termelétricas, pois essas não podem competir com as hidrelétricas em termos de custos marginais, e um fluxo de caixa relativamente certo nos primeiros anos do investimento é muito importante para o setor privado.

Uma forma de regularizar a geração hidrelétrica é utilizar-se o conceito de energia assegurada, conforme mostrado no modelo da seção 2.2. Naquele modelo o parque gerador hidrelétrico é tratado de forma agregada, como se fosse uma única usina. Este é um elemento importante do modelo porque há complementaridades na operação das hidrelétricas. Essas complementaridades advêm do fato de que a volatilidade da energia afluenta natural, em nível agregado, é menor do que a energia afluenta natural em cada hidrelétrica. A menor volatilidade no agregado é explicada pelo fato de que os componentes estocásticos da energia afluenta natural nas diferentes bacias hidrográficas não são perfeitamente correlacionadas. Assim, a probabilidade de ocorrência de um cenário hidrológico desfavorável no nível da usina é maior do que para o parque hidrelétrico como um todo.

Um aspecto importante da energia assegurada, que deve ser considerado pela arquitetura de mercado, é a sua natureza dinâmica. O nível ótimo de energia assegurada de um sistema precisa ser constantemente recalculado para refletir as condições atuais do sistema elétrico. Há uma série de fatores que podem alterar o nível ótimo de energia assegurada:

- a incorporação de novos dados à série histórica da energia afluenta natural, o que torna necessária a atualização da função de distribuição da energia afluenta esperada;
- mudanças no custo do déficit de energia elétrica para a sociedade;
- alterações no custo de geração das termelétricas;
- mudanças na quantidade total demandada ou no comportamento cíclico de demanda; e

⁵² O custo de oportunidade da geração hidrelétrica, isto é, o preço futuro da energia descontado ao tempo presente, somente será utilizado para definir o nível atual de geração se houver um grau de incerteza relativamente baixo quanto ao preço futuro da energia elétrica.

- a instalação de novas hidrelétricas ou reservatórios, que modificam a função de distribuição da energia afluenta.

Por isso, é essencial que a arquitetura de mercado proporcione as condições para que o nível de energia assegurada seja definido e implementado, mas, também, para que ele seja constantemente ajustado às condições correntes do sistema.

No modelo apresentado na seção 2.2 a energia assegurada é definida a partir da função de transição estacionária dos estados dos reservatórios do parque hidrelétrico. Isso é importante para se garantir a configuração ótima do parque gerador. Se a energia assegurada fosse calculada a partir das condições correntes, a geração hidrelétrica seria mais volátil, acarretando investimentos subótimos. É necessário, portanto, levar os proprietários das hidrelétricas a regularizarem a sua geração ao nível de energia assegurada calculado a partir da distribuição da energia afluenta esperada e não das condições correntes. A forma de se conseguir isso é forçar as hidrelétricas a se comprometerem antecipadamente a um nível de geração, antes que seja conhecido o cenário hidrológico do período em que a energia será produzida.

As simulações indicam que a convergência para a função transição estacionária dos estados dos reservatórios é rápida. Em cinco iterações a função distribuição da energia afluenta se aproxima da estacionária. Com isso em mente, a arquitetura de mercado poderia ser tal que a maior parte da energia fosse comercializada com vários anos de antecedência. Isso forçaria as hidrelétricas a definirem a sua oferta com base na sua distribuição de energia afluenta esperada, que deve ser próxima à distribuição estacionária. Um elemento importante para garantir o nível de energia ofertado pelos proprietários das hidrelétricas seria a delimitação de responsabilidade pelo suprimento da energia. Se por algum motivo a hidrelétrica não ofertasse a quantidade que se comprometeu a oferecer, ela teria que pagar pela substituição de sua geração pela de outras fontes ou pagar o custo do déficit para o consumidor lesado.

A configuração do parque gerador

O requisito básico para garantir a configuração ótima no parque termelétrico é oferecer comprometimento. A dificuldade para os investimentos em termelétricas, num sistema predominantemente hidrelétrico, é que o fator capacidade com que cada tipo de

usina opera depende das condições hidrológicas, que variam ao decorrer de vários anos, em contraste com sistemas termelétricos, nos quais o fator capacidade com que uma usina opera é determinado pelo comportamento da demanda, que é relativamente constante e previsível ao longo de cada ano. Isso implica que o fluxo de caixa das termelétricas seria muito instável na ausência de algum comprometimento pelo lado da demanda. Se os primeiros anos de operação de uma nova termelétrica forem de hidrologia favorável, a receita do proprietário da usina será muito baixa ou nula nos primeiros anos, o que elevará significativamente o custo do empreendimento, devido ao custo do capital não amortecido naqueles primeiros anos. Isso resulta num viés muito forte contra termelétricas, especialmente termelétricas de base (inflexíveis). A iniciativa privada só estaria disposta a investir nesse tipo de usina se houvesse um comprometimento de compra por parte dos consumidores.

A configuração ótima do parque termelétrico poderia ser resolvida com a comercialização antecipada da energia elétrica, com o intuito de promover a regularização da geração hidrelétrica, conforme discutido anteriormente. Ao forçar-se todas as empresas geradoras a comprometerem-se com um determinado nível de produção antes do conhecimento do estado da natureza no dia de entrega da energia, as hidrelétricas vêm-se obrigadas a limitar a sua oferta a um nível que seja rentável, dada a sua distribuição de condições hidrológicas esperadas. Isso possibilita às termelétricas ofertarem a sua energia, apesar de seu custo marginal maior. As decisões de compra e venda de energia seriam feitas com base no custo médio de cada usina, considerando-se o fator capacidade requerido, o que promoveria a configuração ótima do parque termelétrico.

A operação hidrotérmica

Enquanto o requisito básico para se obter a configuração ótima do parque gerador é o comprometimento, o requisito básico para se obter a operação hidrotérmica ótima é a flexibilidade. A operação ótima requer a minimização do custo marginal. Para obter-se essa flexibilidade é essencial que o mercado seja centralizado e uniformizado, possibilitando a formação de um mercado secundário, que permite ao mercado ajustar-se às condições correntes do sistema. Para que as termelétricas possam ser operadas de forma flexível é necessário que elas tenham contratos flexíveis de fornecimento de combustível (contratos *take-or-pay* impedem a operação flexível de

usinas). Apesar de o custo de suprimento de combustível ter uma elevada proporção de custos fixos, é possível obter a flexibilidade operacional necessária adotando-se tarifas binomiais.

Para se lidar com alterações não-previstas na demanda é imprescindível que haja um mercado de curto prazo. Nesse mercado, a demanda e oferta instantâneas de energia elétrica seriam equilibradas sob a coordenação do operador do sistema.

Contestabilidade

Para penalizar o abuso do poder de mercado é necessário tornar o mercado contestável. Uma forma de se conseguir isso é permitindo que os comercializadores e consumidores livres ofereçam um grau de comprometimento maior para as novas usinas de geração. Isso poderia ser obtido permitindo que as novas usinas negociassem contratos bilaterais de longo prazo livremente com os comercializadores e consumidores livres, enquanto a venda de energia futura por parte das usinas geradoras existentes seria limitada a um prazo menor. Assim, se o preço da energia futura oferecida pelas usinas existentes fosse elevada a um nível superior ao do custo marginal de longo prazo, os comercializadores e consumidores livres seriam incentivados a fechar contratos bilaterais de longo prazo com novas usinas. Por outro lado, se os preços da energia futura oferecida pelas usinas existentes for igual ou inferior ao custo marginal de longo prazo, os comercializadores e consumidores livres seriam incentivados a comprar a energia das usinas existentes pois esses requerem um nível de comprometimento menor (prazo inferior).

A internalização de externalidades

Neste ensaio não examina-se as externalidades, como restrições de transmissão ou a operação de hidrelétricas em série na mesma bacia hidrográfica. Ressalta-se, contudo, que tais problemas poderiam ser resolvidos, ou pelo menos minimizados, através de mercados paralelos, que operariam conjuntamente com o mercado de energia elétrica. As principais restrições de transmissão poderiam ser tratadas com um mercado de direitos de transmissão (direitos financeiros, não sobre a operação física). No caso brasileiro, isso poderia ser obtido através de leilões de direitos sobre o “excedente financeiro”. Já os problemas de usinas em série na mesma bacia

hidrográfica poderiam ser tratados com um mercado de água⁵³ ou proporcionando ao operador do sistema certa autonomia sobre essas hidrelétricas para garantir a otimização de curto prazo.

2.4.3 Uma proposta

Uma arquitetura que permitiria a coordenação via mercado do sistema elétrico brasileiro requer um alto grau de comprometimento para regularizar a geração hidrelétrica, promover um mercado sustentável e viabilizar os investimentos em termelétricas que poderão ser pouco requisitadas em períodos de hidrologia favorável. Por outro lado, o comprometimento oferecido as usinas existentes não deve prejudicar a contestabilidade do mercado de geração que é essencial para se manter a concorrência. O comprometimento também precisa ser tal que proporcione flexibilidade operacional para permitir o pleno aproveitamento da energia hidrelétrica. A arquitetura proposta para satisfazer esses requisitos é a de múltiplos mercados.

Visão Geral

A peça-chave do plano arquitetônico para o setor elétrico brasileiro seria o **mercado a termo**. A maior parte da energia elétrica consumida no país seria comercializada nesse mercado. Os certificados de energia elétrica vendidos no mercado a termo seriam para suprir energia por três anos, contados a partir do quarto ano após o leilão (um triênio quatro anos à frente). A energia elétrica comercializada no mercado a termo seria padronizada em dois tipos: modulável e não-modulável. Dentro de um prazo pré-estabelecido, os compradores dos certificados de energia elétrica teriam que definir como a energia modulável seria alocada ao longo do tempo para atender a sua demanda (carga). Os certificados de energia elétrica comercializados no mercado a termo poderiam ser recomercializados no **mercado secundário**. Isso permitiria aos agentes se adaptarem às novas condições de oferta e demanda que se materializassem ao longo do tempo (i.e. condições hidrológicas, mudanças no comportamento da demanda, mudanças nos preços de combustível, etc.). Em paralelo ao mercado a termo haveria o **mercado de opções de compra** de energia

⁵³ Lino, Barroso, Pereira, Kelman e Fampa (2001) propõem a resolução do problema de otimização da geração de hidrelétricas em série numa mesma bacia hidrográfica através da implantação de um mercado de água.

elétrica. Nesse mercado, os agentes pagariam um prêmio para ter a opção de comprar energia ao longo de um determinado período, a um preço estipulado em contrato.

Finalmente haveria o **mercado de curto prazo**, no qual energia seria vendida e comprada de forma a equilibrar a oferta e demanda correntes. O despacho seria realizado pelo operador do sistema, que atenderia à demanda (carga) despachando as usinas conforme determinado pelos certificados de energia a termo, moduláveis e não-moduláveis, apresentados pelos agentes. A demanda em excedente aos certificados de energia elétrica a termo seria suprida com energia elétrica disponibilizada no mercado de curto prazo, ao preço do menor lance disponível em cada momento.

Empresas investindo em novas usinas de geração ou na expansão de usinas existentes poderiam oferecer **contratos bilaterais** correspondentes aos montantes de energia modulável e não-modulável a serem acrescentados ao sistema. A oferta desses contratos bilaterais teria que ser pré-aprovados pelo órgão regulador. O prazo de duração dos contratos bilaterais seria limitado a um período inferior ao da concessão ou autorização da usina em questão.

Após o leilão no mercado a termo, todos os consumidores livres e as empresas comercializadoras teriam um prazo de três meses para apresentar a sua **comprovação de capacidade de atendimento de carga trienal** ao órgão regulador, que teria a capacidade de suprir a demanda pela qual seria responsável no triênio seguinte. Essa comprovação seria realizada mediante a apresentação de certificados de compra de energia, contratos bilaterais, opções de compra de energia elétrica suficientes para cobrir pelo menos 120% da demanda atual de sua respectiva carga. As empresas comercializadoras e os consumidores livres que não atendessem a esse requerimento estariam sujeitos a multas ou mesmo à perda da licença de comercializador ou do direito de participar do mercado atacadista de energia como consumidores livres. Além dessa comprovação, haveria a **comprovação de capacidade de atendimento de carga anual**, verificando-se se a soma dos seus certificados de compra de energia, contratos bilaterais, opções de compra de energia elétrica para o próximo ano superam 120% da demanda corrente de sua respectiva carga.

A **concessão e renovação de concessões de hidrelétricas** seria feita mediante licitação competitiva.

As empresas de geração que porventura não honrassem os seus certificados de venda de energia teriam que comprar energia no mercado de curto prazo, ao preço vigente, para substituir a sua energia. Caso a falha em honrar seus certificados de venda de energia resultasse em déficit, a empresa de geração teria que **indenizar o consumidor** lesado pagando o **custo do déficit**, valor esse que seria pré-estabelecido pelo órgão regulador.

As maiores empresas de geração seriam obrigadas a ceder uma pequena fração de sua capacidade de geração para formar a **capacidade de reserva**. A capacidade de reserva seria utilizada pelo operador do sistema para lidar com contingências no sistema elétrico, para suprir os serviços do sistema (*ancillary services*) e para promover a otimização de curto prazo do sistema.

Os mercados a termo e secundário

O mercado a termo consistiria de leilões que ocorreriam a cada três anos. A energia comercializada no mercado a termo seria para entrega física de energia elétrica por três anos, contados a partir do quarto ano após o leilão. Os certificados de energia elétrica seriam padronizados em dois tipos: energia modulável e energia não modulável. Os dois tipos de energia seriam leiloados simultaneamente. Ambos seriam para uma quantia estabelecida de energia elétrica por ano, digamos 8,76 GWh/ano. A energia não-modulável seria para a energia ofertada a uma potência constante, no caso 1 MWh ao longo das 8760 horas do ano. Já os certificados de energia modulável permitiriam que a entrega de energia elétrica fosse concentrada no tempo, de forma a atingir uma potência máxima de até 10 MW, mas sem que a soma da energia ofertada ao longo do ano fosse superior a 8,76 GWh. Os geradores decidiriam qual a composição de energia modulável e não-modulável que teriam condições de ofertar. Por outro lado, as empresas de comercialização de energia e consumidores livres decidiriam a composição necessária dos dois tipos de energia para atender às suas respectivas cargas. Somente empresas de geração pré-credenciadas poderiam ofertar energia nos leilões do mercado a termo e do mercado secundário de certificados de venda de energia, e somente empresas comercializadoras de energia pré-credenciadas

ou consumidores livres teriam permissão para comprar no mercado a termo. Os certificados de venda de energia seriam lastreadas em usinas de geração específicas.

Uma vez realizado o leilão, os compradores receberiam certificados de compra de energia modulável e não-modulável, enquanto os vendedores receberiam certificados de venda de energia modulável e não-modulável correspondentes aos montantes comercializados no leilão. Os certificados de venda de energia somente poderiam ser comercializados entre as empresas de geração no mercado secundário. A aquisição de um título de venda de uma empresa de geração significaria que o novo titular passaria a tomar a responsabilidade por honrar o compromisso de suprimento de energia elétrica. Essas transações seriam registradas no mercado secundário e as informações seriam públicas.

O pagamento pela energia a termo seria realizado mensalmente ao longo dos três anos de vigência dos certificados de energia. As transações no mercado secundário seriam estruturadas de forma a representar descontos ou ágios sobre os pagamentos efetuados durante a vigência dos certificados de energia.

No ano anterior ao início da entrega da energia, os portadores dos certificados de compra de energia modulável definiriam a quantidade mensal de energia modulável a ser entregue ao longo dos três anos do título de energia. Semanalmente, os portadores de certificados de compra de energia modulável definiriam como a sua energia modulável seria alocada ao longo da semana.

Essa seria a única oportunidade para as empresas de geração existentes ofertarem contratos de venda de energia de longo prazo. Após o leilão inicial destes certificados de energia no mercado a termo, somente seria permitida a comercialização de certificados existentes para o período coberto pelos certificados de energia. Qualquer quantia adicional de energia requerida seria suprida pelo operador do sistema ao preço do mercado de curto prazo. Se os certificados apresentados por uma comercializadora (ou consumidor livre) fossem superiores a sua demanda ela (ele):

- receberia um crédito equivalente ao preço do mercado de curto prazo naquele momento, se a energia fosse demanda por outro agente naquele momento,
- teria o superávit de energia modulável alocado para suprir eventuais déficits que viessem a ocorrer ao longo da semana, ou
- perderia o direito àquele montante de energia.

A antecedência com que o leilão é realizado (quatro anos) visa forçar os agentes a se comprometerem, baseados nas condições esperadas e não nas condições correntes do sistema. Isso favorece a obtenção da configuração ótima do parque gerador, pois oferece o grau de comprometimento necessário para viabilizar as termelétricas e favorecer a regularização da geração hidrelétrica. A duração de três anos para os certificados também é importante para se promover a regularização da geração hidrelétrica e para se combater o abuso de poder de mercado. O prazo de três anos torna uma estratégia de contenção de oferta para elevar os preços muito arriscada para as empresas de geração pois se a quantidade vendida for inferior à esperada o prejuízo será considerável, além de essa estratégia apresentar o risco de incentivar a entrada de novas usinas de geração.

A divisão da energia a termo em energia modulável e não-modulável busca recompensar a flexibilidade operacional possibilitada pela instalação de termelétricas flexíveis e de maior potência nas hidrelétricas. Obviamente os certificados de energia modulável receberiam um preço maior, permitindo a recuperação dos custos associados à instalação da potência adicional necessária para atender à demanda de ponta.

A restrição de participação nos mercados a termo e secundário às empresas de geração, consumidores livres e comercializadores pré-credenciados visa evitar que a sinalização de mercado seja balizada pelas condições físicas do sistema.

O objetivo do mercado secundário é permitir que os agentes se adaptem a novas condições (condições hidrológicas, alterações na demanda, a necessidade de interditar usinas para manutenção, etc.), mantendo o nível de comprometimento necessário para a viabilização de termelétricas e a regularização da geração hidrelétrica.

Num cenário de hidrologia favorável, o ajuste via mercado secundário ocorreria da seguinte forma: as hidrelétricas, diante da opção de gerar ou verter, optariam por vender energia secundária sempre que pudessem obter um preço positivo pela energia gerada. Termelétricas com certificados de venda de energia, por outro lado, poderiam maximizar os seus lucros substituindo geração própria por energia secundária das hidrelétricas, desde que essas oferecessem a sua energia a um preço inferior ao seu custo marginal. Assim, seria lucrativo para ambas as partes que as termelétricas vendessem seus certificados de venda de energia a um preço igual ou superior ao seu custo fixo. A hidrelétrica, ao adquirir o título de venda de energia da termelétrica, estaria assumindo a responsabilidade pelo suprimento daquele montante de energia ao longo do período de vigência do título. A hidrelétrica receberia a diferença entre o preço do mercado a termo e o preço pelo qual a termelétrica vendeu o título, valor esse que seria repassado à termelétrica.

Num cenário de hidrologia desfavorável, as hidrelétricas estariam comprometidas a suprir mais energia do que o montante fisicamente possível de suas próprias usinas. Nesse caso, os certificados de venda de energia das hidrelétricas teriam que ser honrados com opções de compra de energia detidas pelos proprietários das hidrelétricas ou através da compra de energia no mercado de curto prazo ao preço vigente. Esgotadas essas possibilidades, essas hidrelétricas teriam que pagar indenizações de valor igual ao custo do déficit para os consumidores não atendidos. Para minimizar a exposição a esses custos adicionais, as empresas de geração hidrelétrica tentariam vender parte de seus certificados de venda de energia para outras empresas de geração hidrelétrica que estivessem em condições hidrológicas mais favoráveis ou para termelétricas que apresentassem capacidade ociosa, sempre que condições hidrológicas desfavoráveis se tornassem evidentes.

Da mesma forma, se uma termelétrica enfrentasse um aumento de seu custo operacional, decorrente de uma elevação no preço do combustível, a ponto de tornar não lucrativa a sua operação ao preço do mercado a termo, por exemplo, ela poderia limitar o seu prejuízo vendendo parte ou todos os seus certificados de venda de energia a um preço próximo ao seu custo fixo.

A realização das transações no mercado secundário poderiam ser estruturadas em rodadas periódicas visando concentrar as atividades comerciais em dias específicos para reduzir os custos de transação e aumentar a liquidez do mercado.

Os certificados de venda de energia do mercado a termo especificariam a usina comprometida. Isso é importante pois permite aos agentes saber como o sistema será operado. Com o conhecimento público dos níveis correntes dos reservatórios e a oferta de certificados de cada hidrelétrica, os agentes podem inferir os níveis dos reservatórios futuros.

Os contratos bilaterais

Aos comercializadores e consumidores livres seria facultativo fechar contratos de longo prazo diretamente com empresas que aumentassem a oferta de energia no sistema, seja através da instalação de uma nova usina de geração ou da expansão da capacidade de usinas de geração existentes. Esses contratos seriam negociados livremente entre as partes, aos preços e prazos por elas acordadas.⁵⁴

Desde que a expectativa de preços para os certificados de compra de energia no mercado a termo fossem semelhantes aos preços oferecidos em contratos bilaterais, os comercializadores e consumidores livres iriam preferir o mercado a termo pelo fato de ele requerer um menor grau de comprometimento e por ele ser mais robusto, em função de apresentar maior diversidade de fontes de geração. Essa preferência deve ser suficiente para evitar o sobreinvestimento decorrente de fechamento de demasiados contratos bilaterais.

Os contratos bilaterais são essenciais para se promover a concorrência no mercado a termo e para se proporcionar o grau de comprometimento necessário para a instalação de novas usinas de geração. Os contratos bilaterais são um substituto dos certificados de compra de energia para os fins de comprovação de capacidade de atendimento da carga. Assim, se o preço no mercado a termo for demasiadamente elevado, os agentes substituirão compras no mercado a termo por contratos bilaterais.

⁵⁴ O prazo máximo permitido seria limitado ao período de concessão ou autorização da usina de geração.

A comprovação da capacidade de atendimento de carga trienal e anual

A exigência de comprovação da capacidade de atendimento de carga antecipada visa garantir a adequabilidade do parque gerador. A ampla antecedência exigida pela comprovação trienal permite uma sinalização antecipada para que os agentes procurem instalar novas usinas de geração, caso seja necessário. As comprovações anuais são importantes dada a tendência histórica de rápido crescimento do setor elétrico. A adequabilidade da oferta de curto prazo seria sinalizada não só pelo mercado de curto prazo, mas também pelos preços do mercado de opções de compra de energia. A comprovação da capacidade de atendimento de carga anual promoveria a compra de opções em períodos em que a oferta de energia é baixa em relação à demanda, reduzindo o risco de inadimplência no caso de oferta insuficiente.

O mercado de opções de compra de energia elétrica

Opções de compra de energia seriam contratos financeiros pelos quais o comprador adquiriria o direito a receber energia elétrica em qualquer momento durante o período de vigência da opção, a um preço pré-estabelecido. O custo da opção seria um prêmio que seria pago mensalmente, durante o período de vigência da opção. Esse instrumento é importante para se viabilizar a instalação de termelétricas flexíveis, necessárias para suprir o mercado durante períodos de hidrologia desfavorável. Devido ao elevado custo médio das termelétricas flexíveis, dificilmente elas conseguiriam vender energia no mercado a termo. No mercado de opções de compra de energia, as termelétricas seriam a alternativa mais barata, entretanto, pois elas apresentam o menor custo fixo. O prêmio mensal que elas receberiam pela venda de suas opções de compra de energia cobriria seus custos fixos.

Ao contrário do mercado a termo e do mercado secundário de certificados de energia, a oferta de opções de compra de energia elétrica seria permitida a qualquer agente interessado, inclusive agentes financeiros. Somente seria necessário um pré-credenciamento, para o qual os participantes teriam de apresentar garantias para evitar problemas de insolvência. A abertura da participação do setor financeiro neste mercado é importante para se impedir o sobredimensionamento do parque gerador e para aumentar a contestabilidade do mercado.

A abertura desse mercado para agentes do setor financeiro não prejudicaria a instalação das termelétricas flexíveis, necessárias para se atender à demanda residual ao menor custo. As usinas térmicas flexíveis estão em posição de vantagem para oferecer opções de compra, pois elas podem atender o exercício de uma opção ao menor preço possível. Quando uma opção é exercida, o agente financeiro que ofertou a opção precisa ofertar energia, comprando a energia ao preço vigente no mercado de curto prazo e recebendo somente o preço acordado na opção. Já a termelétrica flexível atende o exercício da opção gerando a energia de sua usina, que apresenta um custo operacional igual ao preço acordado na opção.

A abertura para o setor financeiro implicaria na arbitragem de qualquer elevação dos preços de opções de energia que não fosse fundamentada no aumento do risco de déficit de energia no setor. Pode-se pensar na permissão da participação do setor financeiro como a imposição de um preço-limite para os preços de opções a cada nível de risco de déficit. Como as opções de compra de energia constituem um substituto para os certificados de compra de energia, para os fins de comprovação de capacidade de atendimento da carga, esse mercado acaba disciplinando o mercado a termo também. As opções de compra de energia tornam mais arriscada uma tentativa não fundamentada (pelos custos ou escassez) de elevação dos preços por parte das geradoras no mercado a termo, pois os consumidores e comercializadores substituiriam certificados de compra de energia do mercado a termo por opções de compra.

Essa participação de agentes do setor financeiro no mercado de opções de compra de energia também teria a vantagem de envolver outros agentes na análise das condições de mercado, permitindo a percepção antecipada de possíveis desequilíbrios entre a oferta e demanda. Tal participação também tornaria mais claras eventuais tentativas de abuso de poder de mercado, através da magnitude dos desvios entre os preços praticados no mercado de curto prazo e os preços das opções (prêmio mais o preço de venda pré-estabelecido) que não fossem justificados por contingências inesperadas.

O sobredimensionamento do parque gerador também seria desincentivado com a participação livre no mercado de opções. Esse desincentivo decorre do fato de que o preço de opções de compra deve convergir para zero à medida que a razão oferta-carga

aumenta. O excesso de capacidade acarretaria uma redução da probabilidade de déficit no sistema elétrico, de modo que a possibilidade de exercício de opções se tornaria muito baixa. No limite, se o risco de déficit fosse nulo e o mercado de curto prazo fosse competitivo, o prêmio das opções deveria cair para zero também. Assim, a recuperação do custos fixos das termelétricas flexíveis através do mercado de opções seria inviabilizada, levando-as a participar agressivamente do mercado a termo (participar com lances abaixo de seu custo médio e superior ao seu custo marginal, de forma a recuperar parte de seu custo fixo). Essa participação agressiva dos proprietários das usinas flexíveis tornaria a lucratividade negativa, expulsando firmas do mercado (levando-as à falência).

O mercado de curto prazo

O mercado de curto prazo seria operado pelo operador do sistema a partir da energia disponibilizada pelas empresas de geração, através de lances. Esses lances poderiam ser recebidos semanalmente (receber lances com mais frequência seria desnecessário e favoreceria tentativas de *gamming*⁵⁵ entre os agentes). Os lances poderiam apresentar duas dimensões: uma curva de oferta de preços para diferentes potências (kW) demandadas e uma curva de oferta de preços para diferentes quantidades de energia (kWh) demandadas durante a semana. O operador despacharia as usinas de geração conforme estabelecido pelos certificados de venda de energia em vigor. A demanda residual seria complementada com a energia disponibilizada no mercado de curto prazo, de forma a minimizar o custo, levando em consideração contingências devidas a falhas de equipamento, restrições de transmissão ou outras externalidades. Usinas de geração que não suprissem a energia comprometida por via de certificados de energia teriam que pagar pela energia não suprida ao preço vigente no mercado de curto prazo; caso não houvesse energia disponível no mercado de curto prazo, a empresa de geração teria que indenizar o consumidor lesado pagando o custo de déficit pré-estabelecido. O operador do sistema também ficaria com a incumbência de identificar quaisquer falhas por parte das empresas do setor elétrico em seguir as ordens de despacho ou dos procedimentos operacionais estabelecidos, para que fossem devidamente punidos pelo órgão regulador.

⁵⁵ *Gamming* é a exploração de falhas nas regras de mercado ou o conluio obtido através de uma sinalização entre os agentes com o intuito de elevar os seus lucros.

Para o pleno funcionamento desse conjunto de mercado seria muito importante haver um monitoramento cuidadoso do mercado de curto prazo, especialmente para combater condutas anticompetitivas. Se alguma forma de *gaming* ou de abuso de poder de mercado fosse permitida, provocando uma elevação dos preços do mercado a curto prazo de forma duradoura, os mercados de opções e a termo seriam afetados, prejudicando-se a operação e expansão eficiente do setor elétrico. Para prevenir isso, o operador do sistema ou o agente de contabilização do mercado deveria produzir relatórios periódicos para explicar o comportamento de preços do mercado de curto prazo. Quando elevações de preços no mercado de curto prazo não se coadunassem com os fundamentos do mercado (i.e. as condições físicas do sistema elétrico), o órgão regulador deveria investigar, junto com os órgãos de defesa da concorrência, se houve infração à ordem econômica.

A capacidade de reserva

Uma pequena fração da capacidade de geração das maiores empresas seria reservada para o uso exclusivo do operador do sistema e seria denominada “capacidade de reserva”. A capacidade de reserva proporcionaria ao operador do sistema um maior grau de manobra para lidar com contingências, prover os serviços do sistema e promover a otimização de curto prazo (particularmente com relativo a otimização de usinas em série numa mesma bacia hidrográfica).⁵⁶ O uso da capacidade de reserva pelo operador do sistema teria que ser registrado e justificado através de relatórios periódicos. A remuneração da capacidade de reserva ocorreria através de tarifas reguladas.

A concessão de hidrelétricas

A concessão e renovação de concessões de hidrelétricas seria feita por meio de licitações competitivas. A concorrência na renovação de concessões de hidrelétricas visaria eliminar vantagens que poderiam advir do seu baixo custo (seja por vantagens intrínsecas do sítio hidrológico ou devido à amortização total ou parcial do custo fixo

⁵⁶ O uso da capacidade de reserva para a otimização de curto prazo pode se tornar desnecessária à medida que o mercado se desenvolver, o que permitiria uma redução da capacidade de reserva requerida. Alguns dos serviços do sistema provavelmente poderiam ser supridos via mercado reduzindo ainda mais a capacidade de reserva requerida.

da usina). Essas vantagens resultariam numa assimetria de custos que possivelmente poderia levar a equilíbrios instáveis no mercado a termo de opções de compra e de curto prazo. Além disso, resultaria em lucros extraordinários para os proprietários arbitrários.

2.5 Conclusão

Esse ensaio mostra que há ganhos significativos em empregar-se os diferentes tipos de recursos naturais concomitantemente na geração de energia elétrica. Esses ganhos decorrem de complementariedades oriundas das propriedades dos recursos naturais empregados e de suas respectivas tecnologias. No caso do setor elétrico brasileiro, a complementariedade decorre da confiabilidade oferecida pela geração termelétrica e do baixo custo da geração hidrelétrica.

O modelo apresentado nesse ensaio proporciona um instrumento para determinar a configuração ótima do parque termelétrico e como operar o parque gerador de forma ótima dados os custos fixos e variáveis das usinas e a função distribuição da energia afluyente natural.

As tecnologias requeridas para aproveitar esses dois tipos de recursos naturais apresentam pré-requisitos diferentes. Enquanto a viabilidade da tecnologia termelétrica requer um alto grau de comprometimento, a tecnologia hidrelétrica requer um alto grau de flexibilidade operacional. Para que a energia elétrica seja comercializada via mercado de forma satisfatória é necessário que o mercado seja estruturado de forma a satisfazer adequadamente as necessidades das duas tecnologias.

A arquitetura de mercado apresentada busca atender a todos os requisitos necessários para que o sistema elétrico seja expandido e operado de forma eficiente. A arquitetura proposta seria formada de um conjunto de instrumentos:

- o mercado a termo,
- os contratos bilaterais,
- a comprovação de capacidade de atendimento de carga,

- o mercado de opções de compra, e
- o mercado de curto prazo.

Esses instrumentos visam promover a expansão e operação do sistema elétrico de forma eficiente, através da concorrência num ambiente de mercado. Para isso busca-se promover a concorrência proporcionando vários substitutos para o suprimento de energia elétrica: certificados de venda de energia, opções de compra de energia e vendas através do mercado de curto prazo. A concorrência também é promovida facilitando-se a contestabilidade através dos contratos bilaterais e da abertura do mercado de opções de compra de energia a agentes de fora do setor elétrico.

Para proporcionar o comprometimento e flexibilidade requeridos pelos dois tipos de tecnologia, o mercado a termo é estruturado de forma rígida, com um leilão a cada três anos para o suprimento do triênio a iniciar-se em quatro anos. Essa longa antecedência do mercado a termo visa proporcionar o grau de comprometimento necessário para garantir a configuração ótima do parque gerador. Por outro lado, o mercado secundário e o mercado de curto prazo, junto com as opções de compra de energia, proporcionam a flexibilidade necessária para otimizar a operação.

Nesse ensaio não se levou em conta a interdependência operacional do parque gerador hidrelétrico, oriunda do elevado número de usinas em série na mesma bacia hidrográfica, com reservatórios com capacidade insuficiente para regularizar o fluxo entre elas. Esse problema seria minimizado com a arquitetura proposta, pois ela promove a regularização da geração e a estabilização do preço através da adoção do mercado a termo. A capacidade de reserva controlada pelo operador do sistema também deveria reduzir esse problema. Esse problema também seria significativamente reduzido se as usinas em série tivessem o mesmo proprietário, o que internalizaria o problema.

Esse ensaio também não leva em conta as restrições de transmissão e outras questões de estabilidade da rede de transmissão. Esses problemas poderiam ser minimizados com mercados de direitos financeiros sobre os principais pontos de restrição da rede (*flowgates*). Esses mercados, entretanto, também estão sujeitos ao

abuso de poder de mercado, limitando a eficácia desse mercado para lidar com essa externalidade.

A arquitetura de mercado proposta proporcionaria vários ganhos em relação à coordenação centralizada que caracteriza o arranjo existente hoje no Brasil. Num ambiente de mercado as técnicas de otimização provavelmente seriam aprimoradas a um ritmo muito mais rápido do que num sistema centralizado. O planejamento descentralizado também poderia resultar numa configuração mais robusta e numa adaptação mais rápida a mudanças no comportamento hidrológico (mudanças climáticas), mudanças no comportamento da demanda, preços relativos, inovação tecnológica e mudanças na própria configuração do parque gerador. Por outro lado, a coordenação via mercado apresenta vários riscos e deficiências, que precisam ser contrabalançadas. Se o grau de concorrência com a arquitetura proposta não for suficiente para conter o comportamento estratégico, equilíbrios instáveis ou menos eficientes poderão resultar. De forma semelhante, se a arquitetura de mercado não internalizar as principais externalidades de forma satisfatória, o mercado poderá resultar em custos mais elevados para a sociedade.

2.6 Referências

- ALLAZ, B. e VILA, J. (1993). Cournot Competition, Forward Markets and Efficiency. *Journal of Economic Theory* 59(1): 1-16.
- ANUATTI NETO, F. e HOCHSTETLER, R. (2001). Competition and Regulation in the Electricity Industry. *Competition and Regulation: The Energy Sector in Brazil and UK/EU*. (A two-day conference of the Centre of Brazilian Studies of the University of Oxford). Oxford: 4-5 junho de 2001.
- ANDERSON, D. (1972). Models for determining least-cost investment in electricity supply. *The Bell Journal of Economics and Management Science* 3(1): 267-299.
- ARAÚJO, J. e ZENDRON, P. (2000). Modelagem do Jogo de Mercado Atacadista de Eletricidade (MAE). *XXVIII Encontro Nacional de Economia*. Campinas: 12-15 de dezembro de 2000.
- AUSUBEL, L. e CRAMTON, P. (1999). The Optimality of Being Efficient. Working Paper. College Park: University of Maryland.
- BACON, R. W.; BESANT-JONES, J. E.; e HEIDARIAN, J. (1996). Estimating Construction Costs and Schedules: Experience with Power Generation Projects in Developing Countries. *World Bank Technical Paper No. 325 (Energy Series)*. Washington: The World Bank.
- BARROSO, L. A. N. (2000). *Esquemas competitivos em sistemas hidrotérmicos: comportamento estratégico de agentes geradores em ambiente de mercado*. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- BARTH, F. T. *et al.* (1987). *Modelos para gerenciamento de recursos hídricos*. São Paulo: Nobel (ABRH).
- BORENSTEIN, S; BUSHNELL, J. (1999). An empirical analysis of the potential for market power in California's electricity industry. *Journal of Industrial Economics* 47(3): 282-323.
- BORENSTEIN, S; BUSHNELL, J. e KNITTEL, C. (1999). Market Power in Electricity Markets: Beyond Concentration Measures. *Energy Journal* 20(4):65-88.
- BUSHNELL, J. (1998). Water and Power: Hydroelectric Resources in the Era of Competition in the Western US. POWER Working Paper PWP-056. Berkeley: University of California Energy Institute.

- CASTRO, A. de L. (2000). *Avaliação de investimento de capital em projetos de geração termoeleétrica no setor elétrico brasileiro usando teoria das opções reais*. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- COMITÊ DE REVITALIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO (2002). *Relatório de Progresso No. 2*. Brasília: Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica.
- COOPERS & LYBRAND *et alli*. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (1997). *Electricity Restructuring Project - Consolidated Report - Stage VII*. Brasília: MME/SEN.
- COUTINHO, P. e OLIVEIRA, A. R. (2000). “Spot and Contract Markets in the Brazilian Wholesale Energy Market.” Working Paper. Brasília: Universidade de Brasília.
- CRAMPES, C. e MOREAUX, M. (2001). Water resource and power generation. *International Journal of Industrial Organization* 19(2001): 975-997.
- CRAMPTON, P.; PEARCE, A. e WILSON, R. (1997). “Auction Design for Standard Offer Service.” Mimeo. College Park: University of Maryland.
- DAVIDSON, C. e DENECKERE, R. (1986). Long-run competition in capacity, short-run competition in price, and the Cournot model. *Rand Journal of Economics* 17(3): 404-415.
- DROUIN, N.; GAUTIER, A.; LAMOND, B. F. e LANG, P. (1996). Piecewise affine approximations for the control of a one-reservoir hydroelectric system. *European Journal of Operations Research* 89: 53-69.
- ELETROBRÁS (1998). *Potencial Hidrelétrico Brasileiro*. Rio de Janeiro: Eletrobrás.
- ESTACHE, A. e RODRIGUEZ-PARDINA, M. (1997). “The Real Possibility of Competitive Generation Markets in Hydro Systems – The Case of Brazil” em Tilmes, K. (coord.). *The Private Sector in Infrastructure: Strategy, Regulation and Risk*. Washington: The World Bank.
- FELICIANO DIAS, R. (coord.) (1996). *Notas sobre racionamento de energia elétrica no Brasil (1940-1980)*. Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil.
- FERNANDES, C. V. S. e FILL, H. D. O. A. (1991). “Avaliação da Robustez de Algumas Distribuições de Extremos.” *IX Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos (Anais 1)*. Rio de Janeiro: 10-14 de novembro.
- GOMIDE, L. S. e CUNHA, L. M. (1981). “Dimensionamento de reservatórios para regularização de vazões.” *IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. (Anais 4)*. Fortaleza: 15-19 de novembro.

- GREEN, R. (1999). The Electricity Contracts Market in England and Wales. *The Journal of Industrial Economics* 47(1): 107-124.
- GROSS, G. e FINLAY, D. J. (1996). An Optimization Framework for Competitive Electricity Power Pools. *V Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*. Recife: 19-24 de maio.
- HOCHSTETLER, R. (1998). *A reforma do setor elétrico no Brasil: as perspectivas de introdução de competição no segmento de geração*. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- HOCHSTETLER, R. (1999). "Competition in the Brazilian Bulk Electricity Market." Latin America and Caribbean Economics Association 1999. Santiago: 20-22 de outubro de 1999.
- JOSKOW, P. L. (2000). "Transaction Cost Economics and Competition Policy". Mimeo. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- KELMAN, J. (Coord.). (2001). *Relatório da Comissão de Análise do Sistema Hidrotérmico de Energia Elétrica: O desequilíbrio entre oferta e demanda de energia elétrica*. Brasília: Agência Nacional das Águas.
- KELMAN, R.; BARROSO, L. A. N. e PEREIRA, M. V. F. (2001). *Market Power Assessment and Mitigation in Hydrothermal Systems*. *IEEE Power Transactions* (forthcoming).
- KLEMPERER, P. D. e MEYER, M. A. (1989). Supply function equilibria in oligopoly under uncertainty. *Econometrica* 57(6): 1243-1277.
- KREPS, D e SCHEINKMAN, J. (1983). Quantity Precommitment and Bertrand Competition Yields Cournot Outcomes. *Rand Journal of Economics* 14(2): 326-337.
- LAFFONT, J-J. e TIROLE, J. (1994). *A Theory of Incentives in Procurement and Regulation*. Cambridge: The MIT Press.
- LEVIN, N. e ZAHAVI, J. (1984). Optimal Mix Algorithms With Existing Units. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 5.
- LEVIN, N. e ZAHAVI, J. (1985). Optimal Mix Algorithms With Limited-Energy Plants. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 5.
- LINO, P. R.; BARROSO, L. A. N.; PEREIRA, M. V. F.; KELMAN, R. e FAMPA, M. H. C. (2001). Operação descentralizada de sistemas hidrotérmicos em ambientes de mercado. : VIII SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica.
- MACEIRA, M. E. P. (1993). Programação dinâmica dual estocástica aplicada ao planejamento da operação energética de sistemas hidrotérmicos com

representação do processo estocástico de afluições por modelos auto-regressivos periódicos. Relatório Técnico No. 237/93. Rio de Janeiro: CEPEL.

- MACEIRA, M. E. P.; KELMAN, J. e DAMÁZIO, J. M. (1987). “Utilização de modelos PAR para simulação e previsão de séries hidrológicas mensais.” *VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos (Anais I)*. Salvador: 8-13 de novembro.
- MELLO, J. C. O.; PEREIRA, M. V. F.; GRANVILLE, S.; LIMA, M. C. A. e ALVARENGA, S. (1997). Assessment of transmission cost recovery applying marginal pricing in hydrothermal power systems. *Electric Power Systems Research* 41: 67-74.
- MENDONÇA, A. F. e DAHL, C. (1999). The Brazilian electrical system reform. *Energy Policy* 27(1999): 73-83.
- NEWBERRY, D. M. (1998). Competition, contracts, and entry in the electricity spot market. *RAND Journal of Economics* 29(4): 726-749.
- OLIVEIRA, A. (1997). “O Novo Mercado Elétrico”. Mimeo. Rio de Janeiro: Insituto de Economia / Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (2000). *Planejamento Anual da Operação Energética Ano 2000: Sistema Interligado Nacional*. Rio de Janeiro: ONS.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (2001). *Operação do Sistema Interligado Nacional: Dados relevantes de 2000*. Rio de Janeiro: ONS.
- OREN, S. S. (2000). Capacity Payements and Supply Adequacy in Competitive Electricity Markets. *VII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*. Curitiba: 21-26 de maio de 2000.
- OREN, S. S.; SMITH, S. e WILSON, R. (1985). Capacity Pricing. *Econometrica* 53(3): 545-66.
- BAUMOL, W. J.; PANZAR, J. C. e WILLIG, R. D. (1982). *Contestable Markets and The Theory of Industry Structures*. New York: Harcourt Brace Jovanovich, Inc.
- PEREIRA, M. V. F.; COSTA, J. P.; CAMPODÓNICO, N. M. e GORENSTIN, B.G. (1987). “Modelos de Expansão da Capacidade de Geração de um Sistema Hidrotérmico.” *VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos (Anais I)*. Salvador: 8-13 de novembro.
- PEREIRA, M. V. e ROSEMBLATT, J. (2000). O novo marco regulatório brasileiro. Mimeo. Rio de Janeiro: Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- POWELL, A. (1993). Trading Forward in an Imperfect Market: The Case of Electricity in Britain. *The Economic Journal* 103(417): 444-453.

- RIGHETTO, A. M. (1998). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos / Universidade de São Paulo.
- ROSS, S. M. (2000). *Introduction to Probability Models* (Sétima Edição). San Diego: Harcourt Academic Press.
- SAUER, I. L. (2001). “Energia Elétrica no Brasil Contemporâneo: A Reestruturação do Setor, Questões e Alternativas.” Mimeo. São Paulo: Instituto de Eletrotécnica e Energia / Universidade de São Paulo.
- SCOTT, T. J. e READ, E. G. (1996). Modelling Hydro Reservoir Operation in a Deregulated Electricity Market. *International Transactions in Operational Research* 3(3/4): 243-253.
- SILVA, E. L. (2001). *Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica*. Porto Alegre: Editora Sagra Luzzatto.
- TERRY, L. A.; PEREIRA, M. V. F.; ARARIPE NETO, T. A.; SILVA, L. F. C. A. e SALES, P. R. H. (1986). Coordinating the Energy Generation of the Brazilian National Hydrothermal Electrical Generating System. *Interfaces* 16(1): 16-38.
- TIROLE, J. (1988). *The Theory of Industrial Organization*. Cambridge: The MIT Press.
- VON DER FEHR, N-H. M. e HARBORD, D. (1993). Spot Market Competition in the UK Electricity Industry. *The Economic Journal* 103(418):531-546.
- WILSON, R. (1999). Market Architecture. Working Paper. Stanford: Stanford University.
- WOLF JR., C. (1993). *Markets or Governments: Choosing between Imperfect Alternatives*. Cambridge: The MIT Press.
- WOLFRAM, C. D. (1999). Measuring Duopoly Power in the British Electricity Spot Market. *American Economic Review* 98(4): 805-826.
- XAVIER, T.M.B.S. e XAVIER, A.F.S. (1987). “Aplicação de Filtragem Binária de Estudo de Ocorrência de Períodos Secos e Chovosos no Nordeste Brasileiro.” *VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos (Anais 2)*. Salvador: 8-13 de novembro.
- ZAHED, K. F. (1987). “Modelos Aplicados à Operação de Sistemas de Reservatórios: Discussão sobre a utilização de modelos gerais.” *VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos (Anais 1)*. Salvador: 8-13 de novembro.

2.7 Apêndice

As simulações realizadas nesse ensaio utilizaram o programa Mathematica® 4.1 versão de estudante.

```
(* parâmetros *)

v0 = 50 + 1;
vmax = 50 + 1;
a = 2;
b = 2.5;
amax = 600 + 1;
amin = 150 + 1;
qf = 332 + 1;
cd = 684;
c1 = 70;
c2 = 40;
f1 = 185000;
f2 = 278000;
dd = 400 + 1;
ps = 0;

q0 =  $\frac{f1}{cd - c1} / 8760 // N$ ;
q1 =  $\frac{f2 - f1}{c1 - c2} / 8760 // N$ ;

(* variáveis de programação*)

fa = Table[0 a, {a, 1, amax}];
faa = Table[0 a, {a, 1, amax}];
pv1 = Table[0 v, {v, 1, vmax}];
pv2 = Table[0 v, {v, 1, vmax}];
ppv1 = Table[0 v, {v, 1, vmax}];
ppv2 = Table[0 v, {v, 1, vmax}];
pq = Table[0 q, {q, 1, amax}];
ppq = Table[0 q, {q, 1, amax}];
tt = Table[0 x, {x, 1, amax}];
flag = 0;

(* definição da função distribuição das afluentes *)

<< Statistics`ContinuousDistributions`;
Do[fa[[x]] = 0, {x, 1, amin}];
Do[fa[[amin + (amax - amin) x]] = N[CDF[BetaDistribution[a, b], x +  $\frac{1}{(amax - amin)}$ ] - CDF[BetaDistribution[a, b], x]],
{x, 0, 1,  $\frac{1}{(amax - amin)}$ }}];
Do[faa[[x]] =  $\sum_{i=1}^x N[fa[[i]]]$ , {x, 1, amax}];
ffa[x_] := Which[x < 1, 0, 1 ≤ x ≤ amax, faa[[x]], x > amax, 1];
fx[x_] := Which[x < 1, 0, 1 ≤ x ≤ amax, fa[[x]], x > amax, 0];

(* tecnologia térmica agregada *)

y[q_] := Which[q ≤ q0, cd q 8760, q0 < q ≤ q1, f1 + c1 q 8760, q > q1, f2 + c2 q 8760];
```

```

(* definição da função distribuição das afluentes *)

<< Statistics`ContinuousDistributions` ;
Do[fa[x] = 0, {x, 1, amin}];
Do[fa[amin + (amax - amin) x] = N[CDF[BetaDistribution[a, b], x +  $\frac{1}{(amax - amin)}$ ] - CDF[BetaDistribution[a, b], x],
  {x, 0, 1,  $\frac{1}{(amax - amin)}$ }]];
Do[faa[x] =  $\sum_{i=1}^x$  N[fa[i]], {x, 1, amax}];
ffa[x_] := Which[x < 1, 0, 1 ≤ x ≤ amax, faa[x], x > amax, 1];
f[x_] := Which[x < 1, 0, 1 ≤ x ≤ amax, fa[x], x > amax, 0];

(* tecnologia térmica agregada *)

y[q_] := Which[q ≤ q0, cdq8760, q0 < q ≤ q1, f1 + c1 q8760, q > q1, f2 + c2 q8760];

(* função distribuição do estado dos reservatórios *)

c = -1;
Do[If[vi == v0, pv2[vi] = 1, pv2[vi] = 0], {vi, 1, vmax}];

While[flag == 0,
  pv1[1] =  $\sum_{vi=1}^{vmax}$  (pv2[vi] ffa[qf + 1 - vi]);
  Do[pv1[vj] =  $\sum_{vi=1}^{vmax}$  (pv2[vi] f[qf + vj - vi]), {vj, 2, vmax - 1}];
  pv1[vmax] =  $\sum_{vi=1}^{vmax}$  (pv2[vi] (f[qf + vmax - vi] + (1 - ffa[qf + vmax - vi])));
  If[ $\sum_{v=1}^{vmax}$  Abs[ $\frac{pv2[v] - pv1[v]}{pv1[v] + .00000000001}$ ] == 0, flag = 1, flag = 0];
  c += 1;

  If[c ≤ 5,
    Print[]; Print[c];
    Do[ppv2[v] =  $\sum_{vi=1}^v$  pv2[vi], {v, 1, vmax}];
    Print["função distribuição do estado dos reservatórios"];
    ListPlot[pv2];
    Print["P[V=0]=", pv2[1], "    P[V=Vmax]=", pv2[vmax], "    variação=",  $\sum_{v=1}^{vmax}$  Abs[ $\frac{pv2[v] - pv1[v]}{pv2[v] + .00000000001}$ ]]];
  ];

  c += 1;
  If[c ≤ 5,
    Print[]; Print[c];
    Do[ppv1[v] =  $\sum_{vi=1}^v$  pv1[vi], {v, 1, vmax}];
    Print["função distribuição do estado dos reservatórios"];
    ListPlot[pv1];
    Print["P[V=0]=", pv1[1], "    P[V=Vmax]=", pv1[vmax], "    variação=",  $\sum_{v=1}^{vmax}$  Abs[ $\frac{pv2[v] - pv1[v]}{pv1[v] + .00000000001}$ ]]];
  ];

  pv2[1] =  $\sum_{vi=1}^{vmax}$  (pv1[vi] ffa[qf + 1 - vi]);
  Do[pv2[vj] =  $\sum_{vi=1}^{vmax}$  (pv1[vi] f[qf + vj - vi]), {vj, 2, vmax - 1}];
  pv2[vmax] =  $\sum_{vi=1}^{vmax}$  (pv1[vi] (f[qf + vmax - vi] + (1 - ffa[qf + vmax - vi])));

];

```

```

Print[];
Print["RESULTADOS"];
Print["função distribuição estacionária do estado dos reservatórios"];
ListPlot[pv2, {PlotJoined-> True, PlotStyle-> Thickness[.01]};
Print["função distribuição acumulada estacionária do estado dos reservatórios"];
ListPlot[ppv2, {PlotJoined-> True, PlotStyle-> Thickness[.01]};
Print["estacionário após ", c-1, " iterações."];
Print["Vmax", 1000 (vmax-1), " GWh"];
Print["P[V=0]", 100 pv2[[1]], "%"];
Print["P[V=Vmax]", 100 pv2[[vmax]], "%"];

(* parâmetros da energia afluenta *)

Print[];
Print["função distribuição da energia afluenta natural"];
ListPlot[fa, {PlotJoined-> True, PlotStyle-> Thickness[.01]};
Print["função distribuição acumulativa da energia afluenta natural"];
ListPlot[faa, {PlotJoined-> True, PlotStyle-> Thickness[.01]};
Print["distribuição", Beta("a", "b"), " com x€[", amin-1, " ", amax-1, "]"];
m =  $\sum_{x=amin}^{amax} (x fa[x])$ ;
Print["média", 1000 (m-1), " GWh/ano"];

(* função distribuição da geração hidrelétrica *)

Do[
  If[q < qf, pq[[q]] =  $\sum_{v=1}^{vmax} pv2[[v]] f[(q+1-v)]$ ];
  If[q == qf, pq[[q]] =  $\sum_{v=2}^{vmax-1} pv2[[v]] + \sum_{v=1}^{vmax} (pv2[[v]] f[(qf+1-v)] + \sum_{v=1}^{vmax} (pv2[[v]] f[(qf+vmax-v)]$ ];
  If[q > qf, pq[[q]] =  $\sum_{v=1}^{vmax} pv2[[v]] f[(q+vmax-v)]$ ];
  , {q, 1, amax}];

Do[ppq[[q]] =  $\sum_{qi=1}^q pq[[qi]]$ , {q, 1, amax}];

Print[];
Print["função distribuição da geração hidrelétrica"];
ListPlot[pq, {PlotJoined-> True, PlotStyle-> Thickness[.01]};
Print["função distribuição acumulada da geração hidrelétrica"];
ListPlot[ppq, {PlotJoined-> True, PlotStyle-> Thickness[.01]};
Print["demanda", 1000 (dd-1), " GWh/ano"];
Print["energia firme", 1000 (qf-1), " GWh/ano"];
s = 1000  $\left( \sum_{q=qf+1}^{amax} \left( q \frac{pq[[q]]}{1 - ppq[[qf]]} \right) - qf \right) // N$ ;
es = If[s < 0, 0, s];
Print["energia secundária esperada", es, " GWh/ano"];

(* parâmetros de custo *)

Print[];
Print["conjunto da tecnologia térmica agregada"];
Plot[y[q], {q, 0, 1}, {PlotStyle-> Thickness[.01]};
Print["custo de déficit", cd, " R$/MWh"];
Print["térmica flexível"];
Print["custo variável", c1, " R$/MWh"];
Print["custo fixo", f1, " R$/MW anualizado"];
Print["térmica de base"];
Print["custo variável", c2, " R$/MWh"];
Print["custo fixo", f2, " R$/MW anualizado"];
Print["valor de energia secundária", ps, " R$/MWh"];

```

(* configuração ótima *)

```

q = amin;
While[ppq[q] ≤ q0 && q ≤ 701, q += 1];
qq0 = q - 1;
d = Max[0, (qq0 - amin)  $\frac{1000}{8760}$  // N];
de = (qq0 - amin) 1000;
ede =  $\left( \sum_{q=amin}^{qq0} \left( \frac{pq[q]}{ppq[qq0]} (q - amin) \right) \right) 1000 // N$ ;
While[ppq[q] ≤ q1 && q ≤ 701, q += 1];
qq1 = q - 1;
k1 = Max[0,  $\left( (qq1 - qq0) \frac{1000}{8760} \right) // N$ ];
ke1 = If[k1 == 0, 0, 1000  $\left( \sum_{q=qq0+1}^{qq1} (pq[q] (q - qq0)) + q0 k1 \frac{8760}{1000} \right) // N$ ];
k2 = Max[0,  $\left( (q1 - qq1) \frac{1000}{8760} \right) // N$ ];
ke2 = If[k2 == 0, 0, 1000  $\left( \sum_{q=qq1+1}^{q1} (pq[q] (q - qq1)) + (1 - q1) k2 \frac{8760}{1000} \right) // N$ ];
Print["CONFIGURAÇÃO ÓTIMA"];
Print["déficit"];
Print["  probabilidade de déficit      ", 100 ppq[qq0], " %"];
Print["  déficit de potência máximo    ", d, " GW"];
Print["  déficit de energia máximo      ", de, " GWh/ano"];
Print["  déficit esperado                ", ede, " GWh/ano"];
Print["usina térmica flexível"];
Print["  potência instalada requerida    ", k1, " GW"];
Print["  energia esperada                 ", ke1, " GWh/ano"];
Print["  fator capacidade                 ", 100 ke1 / (k1 8760), " %"];
Print["usina térmica de base"];
Print["  potência instalada requerida    ", k2, " GW"];
Print["  energia esperada                 ", ke2, " GWh/ano"];
Print["  fator capacidade                 ", 100 ke2 / (k2 8760), " %"];

```

(* custo *)

```

Print["custo variável"];
Print["  déficit esperado                R$", ppq[qq0] ede cd / 1000 // N, " milhões"];
Print["  energia de térmica flexível     R$", ke1 c1 / 1000 // N, " milhões"];
Print["  energia de térmica de base       R$", ke2 c2 / 1000 // N, " milhões"];
Print["custo fixo"];
Print["  térmica flexível                 R$", k1 f1 / 1000 // N, " milhões"];
Print["  térmica de base                  R$", k2 f2 / 1000 // N, " milhões"];
(* Print["energia secundária        - R$", ps es / 1000 // N, " milhões"]; *)
Print["custo anual total esperado    R$", (ppq[qq0] ede cd + ke1 c1 + ke2 c2 + k1 f1 + k2 f2 - ps es) / 1000000 // N,
      " bilhões"];

```

3 Recursos Naturais e Direitos de Propriedade

Uma das características principais que distingue o fator recursos naturais dos outros fatores de produção é a sua origem. Enquanto os fatores trabalho e capital são produtos do esforço humano, os recursos naturais são uma dádiva da natureza. Essa característica do fator recursos naturais é fonte de um dos conflitos mais fundamentais da humanidade: como decidir o destino dos recursos naturais? Numa economia de mercado os proprietários decidem como os seus fatores de produção são empregados e recebem o retorno decorrente do emprego dos seus fatores de produção. No caso dos fatores trabalho e capital, os proprietários são bem definidos: os proprietários dos fatores trabalho e capital são aqueles que ofertam a sua mão-de-obra e a sua poupança. No caso de recursos naturais, contudo, não há proprietários predeterminados, o que causa um problema para o funcionamento do mercado.

Não havendo proprietários é necessário estabelecer uma forma de se atribuir a propriedade sobre os recursos naturais. A atribuição de direitos de propriedade sobre os recursos naturais é algo que a sociedade define através de sua constituição, leis, instituições, regulação, contratos e costumes.⁵⁷ Neste ensaio adota-se a definição de **direitos de propriedade** utilizada por Berzel (1997), que consiste no grau de controle que o indivíduo dispõe sobre o emprego de seus fatores de produção e sobre as benesses por elas proporcionadas.⁵⁸ A atribuição dos direitos de propriedade sobre recursos naturais é um desafio de importância fundamental numa economia porque a atribuição dos direitos de propriedade não só afeta a distribuição da riqueza na sociedade, como também influencia a forma como os recursos são empregados e, conseqüentemente, o nível de bem-estar social da economia.

⁵⁷ Alessi (1990) apresenta uma resenha da literatura relativa ao estudo dos direitos de propriedade.

⁵⁸ Barzel (1997), p. 3. Note que essa definição distingue os direitos de propriedade dos direitos legais; direitos legais facilitam o monitoramento e cumprimento dos direitos de propriedade, mas não são condições necessárias ou suficientes para se obter o controle sobre os fatores de produção.

A demanda por direitos de propriedade sobre um recurso natural surge quando o valor do recurso natural para a sociedade passa a superar o custo de monitoramento e fiscalização desses direitos.⁵⁹ De semelhante modo, a delimitação dos direitos de propriedade sobre os recursos naturais é elaborada à medida que essa delimitação mais detalhada torna-se economicamente necessária. Geralmente o que se observa é que os direitos de propriedade não são definidos de forma deliberada pela sociedade, e sim por um processo espontâneo no qual indivíduos tomam posse de determinados recursos quando esses passam a ser valorados. Neste ensaio denominamos essa forma de atribuição de direitos de propriedade de **princípio da apropriação**. A apropriação pode ocorrer de duas formas:

- pela descoberta ou
- pela força.

Quando a apropriação é feita por aquele que “descobriu” o recurso natural, isto é, tornou econômico o exercício do direito de propriedade (do controle) sobre o recurso natural, diz-se que a apropriação ocorreu segundo o **critério da descoberta**. Essa “descoberta” pode ocorrer de várias formas, através da introdução de:

- um novo recurso natural previamente desconhecido;
- um novo uso para um recurso natural já conhecido;
- uma nova fonte de um recurso natural conhecido, porém escasso; ou
- uma nova técnica de cultivo ou extração de um recurso natural que torna viável a sua exploração (onde antes não era viável).⁶⁰

O princípio da descoberta é uma forma de associar os direitos de propriedade sobre recursos naturais ao “esforço” humano e, assim, definir quem determina como o recurso natural é empregado e quem recebe as benesses oriundas do emprego do recurso natural. A outra forma de apropriação é pela força, sendo que o agente mais poderoso impõe-se sobre outro para controlar um determinado recurso natural.

Na literatura econômica a causa apontada para a maior parte dos problemas associados ao uso de recursos naturais é a falta de uma delimitação precisa dos direitos de propriedade sobre os recursos naturais. Para resolver os problemas decorrentes das

⁵⁹ Barzel (1997), pp. 85-104.

⁶⁰ Note que muitas “descobertas” de recursos naturais envolvem inovações tecnológicas. Os benefícios proporcionados por essas inovações tecnológicas geralmente são considerados como decorrentes unicamente de ganhos de eficiência, sendo freqüentemente ignorado o uso mais intensivo do capital natural.

externalidades, por exemplo, bastaria delimitar os direitos de propriedade de forma a “internalizar” as externalidades; de forma semelhante, para resolver o problema da “tragédia dos comuns”⁶¹ bastaria delimitar os direitos de propriedade sobre o recurso natural de forma a torná-lo um bem excludente. A distribuição da propriedade dos recursos naturais seria irrelevante desde que a delimitação dos direitos de propriedade não fosse ambígua.

Essa despreocupação com a distribuição da propriedade dos recursos naturais decorre do Teorema de Coase:

...se transações de mercado não fossem custosas, só importaria (excluindo-se questões distributivas) que os direitos dos diversos partidos fossem bem definidos e os resultados de ações judiciais previsíveis.⁶²

Em outras palavras, esse teorema afirma que na ausência de custos de transação o bem-estar social é maximizado, via transações de mercado, independentemente da distribuição inicial dos fatores de produção. Assim é possível isolar as questões de eficiência econômica das questões meramente distributivas. O apelo do Teorema de Coase é grande, pois ele permite aos economistas concentrarem-se nas questões de eficiência econômica, que envolvem uma análise positiva, através da qual pode-se recomendar políticas econômicas que beneficiam a sociedade como um todo (ótimo de Pareto), em contraste com as questões distributivas, que requerem uma análise normativa, e geralmente são muito polêmicas.

Apesar do apelo do Teorema de Coase, o aspecto mais importante desse teorema não é a sua conclusão e sim a hipótese requerida pelo teorema: a ausência de custos de transação. **Custos de transação** são os custos de aquisição de informações sobre alternativas de uso dos recursos e de negociação, monitoramento e fiscalização de contratos.⁶³ A hipótese de que custos de transação são nulos é muito restritiva. Na citação apresentada no parágrafo anterior, Coase demonstra estar consciente de que

⁶¹ A tragédia dos comuns designa a sobreexploração de fatores de produção ou bens não-excluídos, isto é, aqueles fatores ou bens cujo acesso não pode ser limitado (na ausência de barreiras institucionais). O exemplo clássico de recursos comuns é a pesca marítima.

⁶² Coase (1960), p. 19 (traduzido pelo autor). Coase (1988), capítulo 6, apresenta uma nova versão desse teorema, na qual ele argumenta que, na ausência de custos de transação, tanto a eficiência como a distribuição da riqueza independem de a quem os direitos são atribuídos.

⁶³ Essa é a definição de custos de transação proposta por Alessi (1990).

custos de transação existem e que são significativos ao empregar o pretérito imperfeito do subjuntivo: “se transações de mercado não *fossem* custosas”. Aliás, Coase (1960) –no artigo que deu origem ao que tornou-se conhecido como Teorema de Coase⁶⁴– concentra a maior parte de sua atenção à análise de situações nas quais os custos de transações são significativos.

Havendo custos de transação, a atribuição de direitos de propriedade torna-se mais crítica, pois passa a afetar não só a distribuição de riqueza mas também a forma como os fatores de produção são empregados. Nas palavras de Coase:

Num mundo em que há custos para se rearranjar os direitos estabelecidos pelo sistema legal, os tribunais, em casos relativos a transtornos públicos, estão, de fato, definindo a questão econômica de como os recursos hão de ser empregados.⁶⁵

Implícita na atribuição de direitos de propriedade está a formação do conjunto de instituições que governa o emprego dos fatores de produção, dentre os quais figuram os recursos naturais. A existência de custos de transação significa que a atribuição de direitos de propriedade não pode ser facilmente modificada, dificultando desvios do *status quo*. Essa resistência a mudanças no *status quo* introduzida pelos custos de transação impede o expurgo de instituições ineficientes pelo mercado, reduzindo o bem-estar social.

A história econômica demonstra que custos de transação freqüentemente são significantes e que o bem-estar social não é plenamente maximizado. Vários estudos de casos demonstram que a forma como os direitos de propriedade sobre recursos naturais são definidos e distribuídos é um fator determinante no desenvolvimento econômico. A história sugere que a capacidade das forças de mercado de expurgar as instituições ineficientes é limitada. As instituições tendem a ser mais influenciadas por pressões econômicas dos interesses privados mais diretamente afetados. Os interesses sociais expressos pela pressão de mercado tendem a ser mais dispersos e, portanto, menos eficazes na transformação das instituições. Logo, ao definir-se a distribuição da propriedade de recursos naturais, está-se, simulâneamente, definindo a distribuição da

⁶⁴ A denominação “Teorema de Coase” foi dada por Stigler (1990), pp. 117-20.

⁶⁵ Coase (1960), p. 27.

riqueza e do poder político que, por sua vez, determinam o processo de criação e modificação das instituições.⁶⁶

O objetivo desse ensaio é examinar como a atribuição dos direitos de propriedade sobre os recursos naturais afeta o desenvolvimento econômico. A tese desse ensaio é que características intrínsecas dos recursos naturais tornam a sua transação custosa. Isto implica, conforme o Teorema de Coase, que as forças de mercado não asseguram a maximização do bem-estar social e, portanto, que a atribuição de direitos de propriedade sobre os recursos naturais desempenha um papel determinante no desenvolvimento econômico.

Há duas características intrínsecas dos recursos naturais que fazem com que eles apresentem altos custos de transação:

- a sua multiplicidade de atributos e
- a sua origem autônoma.⁶⁷

Os recursos naturais apresentam muitos e variados atributos. Essa propriedade significa que os recursos naturais podem ser empregados de formas muito diversas. O custo de adquirir informações sobre o valor proporcionado por cada emprego alternativo do recurso natural torna inviável ao seu proprietário definir como melhor empregar o recurso. O proprietário terá que definir o emprego do recurso baseado no seu conhecimento limitado.⁶⁸ Além disso, a exploração de certos atributos dos recursos naturais pode afetar a exploração de seus outros atributos. Em outras palavras, a multiplicidade de atributos resulta em externalidades.

A segunda característica intrínseca dos recursos naturais que torna a sua transação custosa é sua origem autônoma. Recursos naturais originam-se da mãe-natureza, não podendo ser produzidos pelo esforço humano. A humanidade pode

⁶⁶ Libecap (1989).

⁶⁷ Brown (2000) identifica cinco fatores que tornam complexa a definição de direitos de propriedade dos recursos naturais (especificamente, recursos naturais renováveis). Uma das características identificadas por Brown coincide com a destacada nesse ensaio: o fato de os recursos naturais serem uma forma de capital que requer que se considere o custo de oportunidade intertemporal dos recursos naturais. Os outros quatro fatores identificados por Brown (a profusão de externalidades, a relevância da localização geográfica, a interdependência dos serviços prestados, serviços não-excluentes e não transacionados no mercado) decorrem da multiplicidade de atributos dos recursos naturais.

⁶⁸ Barzel (1997) argumenta que a delimitação perfeita de direitos de propriedade sobre recursos geralmente não é econômica porque a mensuração de todos os atributos do recurso é custosa (pp.4-5).

explorar os recursos naturais existentes de forma mais intensiva, mas não pode criá-los. Pode-se pensar nos recursos naturais como uma forma de capital. Quando o capital natural é empregado, ele sofre uma depreciação. Essa depreciação decorre da exaustão de recursos não-renováveis (como minérios), da extinção de recursos renováveis (como espécies de plantas e animais) e da alteração do meio ambiente. Isso significa que, para definir a melhor forma de empregar os recursos naturais, deve-se levar em conta o seu custo de oportunidade intertemporal.⁶⁹ Há uma inevitável limitação de informações na avaliação do custo de oportunidade intertemporal pois os usos alternativos futuros dos recursos naturais são desconhecidos pela geração atual, assim como os impactos que o seu uso atual terá sobre os seus possíveis usos futuros. Há uma assimetria de informações entre as gerações.

Os custos de transação decorrentes da multiplicidade de atributos e da avaliação do custo de oportunidade intertemporal dos recursos naturais tornam crítica a atribuição de direitos de propriedade sobre recursos naturais, pois ela tende a definir como os recursos naturais são utilizados.

Essas duas características intrínsecas dos recursos naturais estão por trás da maior parte dos problemas estudados no campo da economia dos recursos naturais e do meio ambiente. O primeiro ensaio dessa tese, por exemplo, trata do uso intertemporal dos recursos naturais e de sustentabilidade. Esse tema surge do fato de que os recursos naturais são de origem autônoma. Já o tema do segundo ensaio dessa tese, a análise da arquitetura de mercado adequada para um sistema elétrico hidrotérmico, decorre da multiplicidade de atributos dos recursos naturais.

No presente ensaio examina-se como a forma de atribuição de direitos de propriedade sobre recursos naturais afeta o desenvolvimento econômico à luz dessas duas características intrínsecas. Analisa-se particularmente a atribuição dos direitos de propriedade baseada no princípio da apropriação. Três casos históricos são examinados para ilustrar a importância da atribuição de direitos de propriedade sobre recursos naturais no desenvolvimento econômico.

⁶⁹ A análise do custo de oportunidade intertemporal é necessária sempre que o uso do recurso natural puder resultar na depreciação, esgotamento ou extinção do recurso natural.

A seção 3.1 mostra como a multiplicidade de atributos dos recursos naturais sob dois regimes de atribuição de direitos de propriedade distintos afeta o desenvolvimento econômico. O caso escolhido para ilustrar esse problema baseia-se no relato histórico de Squatriti (1998) do uso dos recursos hídricos na península italiana durante os primórdios da Idade Média. Comparando-se a forma que os recursos hídricos eram usados e o regime de direitos de propriedade no império romano e na Itália medieval percebe-se como a atribuição de direitos de propriedade afeta o desenvolvimento econômico.

A seção 3.2 examina a vulnerabilidade do crescimento econômico baseado na exploração de recursos naturais. Essa fragilidade decorre da origem autônoma dos recursos naturais, o que implica que o seu uso presente pode afetar negativamente a fronteira de possibilidades de produção das gerações futuras. Essa fragilidade tende a ser exacerbada quando o regime de direitos de propriedade é baseado no princípio da apropriação. Essa vulnerabilidade é conhecida como a maldição dos recursos ou *Dutch disease*. Para ilustrar esse problema examina-se o ciclo da borracha na Amazônia a partir do relato feito por Barham e Comes (1996).

Na seção 3.3 o regime de patentes é examinado como uma forma de se atribuírem direitos de propriedade. O regime de patentes incentiva a pesquisa e desenvolvimento, o que reduz a limitação e assimetria de informações associadas à análise do custo de oportunidade intertemporal e à multiplicidade de atributos dos recursos naturais, mas introduz outras distorções que precisam ser consideradas. A experiência recente da indústria de sementes transgênicas é examinada a partir do relato de Charles (2001). A análise explora critérios que podem ser úteis na identificação de regimes de direitos de propriedade mais apropriados para o emprego dos recursos naturais de forma a se maximizar o bem-estar social.

3.1 A multiplicidade de atributos de recursos naturais: o caso dos recursos hídricos no império romano e na Itália medieval

Para ilustrar como a atribuição de direitos de propriedade afeta o desenvolvimento econômico quando os recursos naturais apresentam múltiplos atributos, examina-se o uso dos recursos hídricos na península italiana em dois períodos caracterizados por regimes de atribuição de direitos de propriedade distintos.

Os recursos hídricos apresentam múltiplos atributos, o que permite que eles sejam explorados de formas bastante variadas. Esses usos múltiplos dos recursos hídricos não são completamente independentes uns dos outros: eles são interrelacionados. Os custos de mensuração dos efeitos de uma atividade sobre a outra e de obtenção de informações sobre o benefício gerado por cada uso dos recursos hídricos tornam difícil a identificação da melhor uso dos recursos hídricos via mercado. Além disso, as externalidades associadas a alguns usos dos recursos hídricos são tão significativas que tornam outros usos praticamente inviáveis. Esse é o caso apresentado nessa seção. Sendo assim, o regime de direitos de propriedade é fundamental pois a forma de uso favorecida pelo regime de atribuição de propriedade tenderá a dominar, enquanto as outras formas de uso serão reprimidas.

O regime de propriedade sobre os recursos hídricos na península italiana modificou-se radicalmente entre o período do império romano e o início da idade medieval. No império romano os recursos hídricos eram vistos primordialmente como um bem público. Conforme a lei romana, as águas eram *res publica extra patrimonium*, o que significa que o Estado tinha a competência para ouvir e decidir sobre questões referentes ao uso das águas, mas não comercializava os direitos de propriedade sobre os cursos d'água. O papel do Estado era simplesmente o de garantir que o uso dos recursos hídricos estivessem à disposição de todos os seus cidadãos. Segundo a lei romana, os recursos hídricos não eram objetos passíveis de posse, e somente podiam ser explorados. Nesse sentido, a sociedade romana atribuía direitos de propriedade sobre os recursos hídricos somente quando investimentos eram necessários, e desde que os demais usuários não fossem prejudicados. Os direitos de propriedade não eram transferíveis, entretanto, e, uma vez abandonada a atividade econômica que assegurava os direitos de propriedade, os recursos hídricos voltavam ao domínio público.

Já na Itália medieval os recursos hídricos passaram a ser vistos como parte do patrimônio do detentor das terras pelas quais passava o curso d'água. Dada a importância dos recursos hídricos, freqüentemente esse direito era explicitamente expresso no título de terra com a frase: “com o uso das águas”. Nesse período, os direitos privados passaram a prevalecer sobre os direitos comuns. Essa mudança de postura com relação aos recursos hídricos afetou o desenvolvimento de todas as atividades associadas aos recursos hídricos.⁷⁰

A comparação dos efeitos da mudança de um regime de direitos de propriedade tal qual o prevalescente no império romano para o prevalescente na Itália medieval demonstra como alguns atributos dos recursos hídricos são melhor desenvolvidos num regime e prejudicados em outro regime de propriedade. Ao permitir-se o direito de propriedade privada sobre os recursos hídricos na Itália medieval, abriu-se o caminho para a intensificação de várias atividades nos cursos d'água. A segurança decorrente da detenção da propriedade sobre os recursos hídricos tornou o ambiente mais favorável para a realização de investimentos privados. Assim, na Itália medieval verificaram-se melhorias nos moinhos de água construídos e a intensificação da pesca. Por outro lado, outras atividades (e os investimentos a elas associados) foram prejudicadas, como, por exemplo, a navegação e os sistemas hidráulicos. Identificar qual é o regime de direitos de propriedade sobre recursos naturais que maximiza o bem-estar é uma tarefa complexa, que requer uma avaliação de todos os atributos dos recursos naturais.

3.1.1 Moinhos de água

Até o século VIII, os direitos de propriedade para o uso da água por moinhos não eram bem especificados. Os donos de moinhos precisavam ser sensíveis aos interesses dos outros usuários do curso d'água. Conflitos não eram incomuns; aliás, o sentido moderno da palavra rival deriva-se dessa época, da palavra latina *rivale*, que significava povo ribeirinho. A dificuldade associada à atribuição de direitos de propriedade para moinhos decorre de várias externalidades: as barragens utilizadas nos moinhos de água alteram o fluxo de água do rio, podendo causar alagamentos, assoreamento, suspensão de sedimentos, erosão e elevação da temperatura da água. Essas mudanças afetam o habitat aquático e, conseqüentemente, os peixes, insetos,

⁷⁰ Squatriti (1998), pp. 70, 85, 91 e 100.

animais, plantas e populações ribeirinhas a jusante da barragem. A reação a alguns moinhos foi tão forte que em 643 D.C. foi redigido o *Edictum Rothari*, que autorizava a destruição de represas que causassem “danos injustificáveis”.⁷¹

Esse regime de direitos de propriedade sobre os cursos d’água favorecia a manutenção dos rios no seu estado natural. Conseqüentemente, durante esse período moinhos pequenos e simples tendiam a ser preferidos a moinhos maiores e mais complexos, apesar da menor eficiência desses moinhos pequenos e simples. Alguns moinhos eram desmontáveis, permitindo aos proprietários mudar o moinho para um outro local caso fosse necessário ou conveniente.⁷²

A partir do século IX (na Itália medieval), concessões especificando direitos de água para moinhos proporcionaram um ambiente mais propício à instalação de moinhos. Os investidores privados responderam a esse ambiente favorável através da aprimoração dos moinhos existentes e da instalação de novos moinhos. Assim, os maiores “*rivales*” de novos moinhos deixaram de ser os povos ribeirinhos, sendo substituídos pelos proprietários de outros moinhos que queriam suprir a mesma clientela.⁷³

3.1.2 Pesca

A indústria pesqueira na península italiana já era bem desenvolvida no período do império romano e continuou a se desenvolver no período medieval. Várias modificações ocorridas na indústria pesqueira ao longo desse período decorreram diretamente da mudança no regime de direitos de propriedade. No império romano já havia viveiros de peixes construídos para a criação, o armazenamento ou a captura de peixes. No império romano, a maioria dos viveiros estava situada na costa marítima. Já na Itália medieval a maioria dos viveiros situava-se nos rios. Parte da explicação para isso está na mudança da preferências de peixes marítimos para peixes de água

⁷¹ Squatriti (1998), pp. 131-2 e 140.

⁷² Outra razão pela qual moinhos simples, pequenos e desmontáveis eram preferidos era a incerteza com relação ao fluxo de água do rio. Uma seca prolongada poderia levar um moinho à falência. Squatriti (1998), p. 130.

⁷³ Mesmo com a definição de direitos de propriedade sobre a água para moinhos, os conflitos continuaram a existir. A natureza dos conflitos era outra, entretanto. A maioria dos conflitos passou a ser entre moinhos, freqüentemente motivada pelo desejo de se reduzir a concorrência através da disputa sobre os direitos de uso da água. Squatriti (1998), p. 142.

doce ocorrida na Idade Média,⁷⁴ mas a razão principal foi o novo regime de direitos de propriedade. No império romano a instalação de viveiros de peixes nos rios não era comum, porque a lei romana não permitia a obstrução dos rios. Em contraste, na Itália medieval a obstrução dos rios não era uma preocupação, e a outorga de direitos exclusivos de pesca em partes do rio tornou-se comum.⁷⁵ As represas dos moinhos de água também contribuíam para a promoção da pesca, pois os lagos formados pelas represas criavam ambientes propícios para a instalação de viveiros de peixes.⁷⁶

O regime de direitos de propriedade sobre a pesca na Itália medieval estimulou a intensificação da pesca nos rios. A pesca passou a ser mais cuidadosamente administrada. Os proprietários, visando maximizar as benesses de sua propriedade, alugavam direitos de pesca quando a oferta excedia a demanda. Uma grande variedade de formas contratuais surgiu: desde o pagamento de pedágio de acesso pelos pescadores, até pagamentos proporcionais à quantidade pescada.

A disponibilidade natural de peixe era cíclica devido ao seu ciclo reprodutivo e às suas migrações sazonais. Para aumentar a oferta de peixe nos períodos em que a disponibilidade natural era baixa, os peixes passaram a ser criados e armazenados em viveiros. De semelhante modo, para não perder o excesso de oferta nos períodos de maior disponibilidade natural, várias formas de preservar o peixe foram adotadas como a salga e a defumação (além da venda nas feiras a preços reduzidos).⁷⁷

As concessões dos direitos de pesca estimulou investimentos nessa atividade. As *piscariae* e *piscationes*, como eram denominadas as concessões de pesca na Itália medieval, freqüentemente pareciam fazendas. Elas eram equipadas com várias construções, podendo ter um moinho d'água, bosques, vinhedos e pastagens. Assim, os pescadores dispunham das matérias-primas necessárias para os seus viveiros de peixes e material de pesca (madeira e cordel, principalmente) e para suprir as suas

⁷⁴ Essa mudança nos gostos decorreu em parte da influência dos mosteiros, que descreviam o peixe de água doce como o alimento ideal e puro. Afinal, o peixe de água doce era o alimento que Cristo comia, não continha sangue e não era associado aos peixes demoníacos do oceano, descritos no Apocalipse. A elite romana, por outro lado, preferia o glamour dos peixes do Mar Mediterrâneo. Squatriti (1998), pp. 99 e 106.

⁷⁵ Squatriti (1998), pp. 100-1, 105 e 109-10.

⁷⁶ Squatriti (1998), p. 106.

⁷⁷ Squatriti (1998), pp. 113-5

necessidades de subsistência. Viveiros cada vez maiores, mais complexos, sólidos e obstrutivos passaram a ser construídos. Lagos artificiais eram criados, a hidrologia do rio era modificada para atender as necessidades das espécies de peixes criadas nos viveiros (nível de oxigenação, temperatura e disponibilidade de nutrientes), divisórias eram instaladas para separar os peixes de diferentes espécies ou idades. Desse modo, a indústria pesqueira aumentava a sua produtividade.⁷⁸

3.1.3 Navegação e sistemas hidráulicos

Embora a privatização dos recursos hídricos na Itália medieval tenha beneficiado a instalação de moinhos de água e a pesca, ela prejudicou uma série de outras atividades. Como mencionado anteriormente, a instalação de moinhos de água e de viveiros de peixes obstruía e modificava a hidrologia dos rios. A primeira vítima dessas intervenções nos rios foi a navegação. A prioridade dada aos moinhos e à pesca, em detrimento da navegabilidade, decorre em parte de outras mudanças estruturais que ocorriam àquela época. A perda da navegabilidade dos rios foi acompanhada por uma deterioração dos meios de transporte como um todo, decorrente da redução da integração e do comércio inter-regional, após a queda do império romano.⁷⁹

O declínio do império romano significava a queda do poder estatal centralizado e sua substituição pelo sistema feudal. Com a fragmentação do poder na sociedade, as regiões tornaram-se mais autônomas, o fluxo de comércio entre diferentes regiões reduziu-se e conflitos armados tornaram-se mais comuns. A construção e a manutenção de grandes obras públicas foram muito prejudicadas pois a coordenação e mobilização de recursos necessários para tal tornou-se cada vez mais difícil. Grande parte da infra-estrutura herdada pelo império romano, na forma de barragens, muros de contenção para o controle de cheias, canais e aquedutos, foi negligenciada e abandonada. As consequências desse abandono foram logo sentidas.⁸⁰

Os aquedutos romanos haviam sido construídos dentro do sistema *patronatus*. Nesse sistema, os patronos (geralmente imperadores ou nobres) construíam o aqueduto e ofereciam a água gratuitamente à população. Apesar de alguns patronos se

⁷⁸ Squatriti (1998), pp. 105, 116-9.

⁷⁹ Caldwell (1995), p. 111.

⁸⁰ Squatriti (1998), pp. 69-72.

apropriarem de parte da água, os aquedutos, em geral, eram verdadeiras obras públicas, atendendo à população como um todo. O retorno para o patrono era o prestígio que o aqueduto proporcionava. O grande benefício proporcionado pelos aquedutos era a abundância de água de boa qualidade. Eles não chegavam a substituir os poços artesianos, cisternas e fontes naturais de que a população geralmente se utilizava para suprir suas necessidades diárias.⁸¹ Os aquedutos permitiam, entretanto, o uso de água para outros fins, geralmente não disponíveis ao cidadão urbano: banhos públicos, fontes, moinhos de água urbanos e, em cidades mais remotas do Império Romano, aquecimento.⁸² Além disso, a abundância de água de boa qualidade proporcionada pelos aquedutos reforçava a idéia, prevalente na época, de que a água deveria ser fornecida gratuitamente. Apesar de a água ter sido comercializada em determinados momentos e em certos lugares, a expectativa geral era de que a água era um direito de todos os indivíduos e pagar por ela era mal visto. Muitos aquedutos foram mantidos ou restaurados na Itália medieval, mas os poucos novos aquedutos construídos no período tendiam a atender necessidades privadas do patrocinador do projeto (geralmente mosteiros, governantes ou a Igreja). Essa privatização das águas teve o efeito de concentrar o poder da Igreja e das autoridades feudais, tornando as massas cada vez mais dependentes das autoridades locais.⁸³

O controle das águas dos rios foi uma das áreas que passou por grandes mudanças com a queda do império romano e a crescente privatização das águas. Os romanos haviam feito enormes investimentos em drenagem de áreas pantanosas, para permitir a agricultura, e em muros de contenção, para evitar inundações. O abandono dessas grandes obras públicas (reflexo direto da estrutura de incentivos proporcionada pelo novo regime de direitos de propriedade sobre os cursos d'água adotado após a queda do império romano), somados às mudanças climáticas e hidrológicas (causadas, em grande parte, pelo “desenvolvimento” durante o império romano) resultou em terríveis e recorrentes enchentes. É interessante, entretanto, observar como a sociedade se adaptou a essa nova realidade. Ao longo dos anos, áreas pantanosas nas quais os romanos praticavam a agricultura foram abandonadas. Em vez de terrenos contínuos,

⁸¹ Para a maioria dos cidadãos, o custo de carregar a água do aqueduto até a residência para o uso diário era maior do que o custo de construir e manter um poço ou uma cisterna.

⁸² As cidades romanas eram construídas de maneira tal que permitia a circulação de água aquecida por baixo do piso de suas residências e áreas de trabalho, servindo para a calefação no inverno.

⁸³ Squatriti (1998), pp. 11-2, 21-3, 29-30 e 91-3.

os agricultores medievais se conformavam com terrenos fragmentados, passando suas plantações a ser intercaladas com terrenos baldios e pântanos. Esses terrenos baldios e pântanos passaram então a regularizar o fluxo de água nos rios. Além disso, os agricultores medievais aprenderam a tirar proveito de vários produtos que os pântanos ofereciam.⁸⁴

O efeito da privatização dos cursos d'água sobre a irrigação e drenagem na Itália medieval foi ambíguo. A queda do poder estatal centralizado e de suas leis de certa forma tornou mais difícil a instalação de canais de irrigação, pois esses necessariamente requerem um elevado grau de coordenação e cooperação. Por outro lado, a privatização proporciona incentivos melhores para pequenos projetos de irrigação e drenagem; de fato, há mais registros de valas de drenagem na agricultura medieval do que anteriormente. É possível, entretanto, que esse aumento no número de valas de drenagem registrados seja decorrente da importância maior dada aos registros no sistema de propriedade privada e não a um aumento no número de valas de drenagem existentes.⁸⁵

3.1.4 Reflexões

A multiplicidade de atributos dos recursos naturais freqüentemente acarreta conflitos entre os seus usos alternativos. Há recursos naturais que podem ser utilizados tanto para prover bens privados como bens públicos. Esses dois usos são incompatíveis entre si, pois, enquanto bens privados são excludentes e rivais, bens públicos são não-excludentes e não-rivais. Assim, o regime de direitos de propriedade mais adequado para uma forma de uso tende a ser inapropriado para outra forma de uso. Trata-se de uma situação na qual o regime de direitos de propriedade sobre os recursos naturais afeta o rumo do desenvolvimento econômico.

O caso estudado demonstra que um regime de direitos de propriedade não é universalmente superior a outro. Diferentes regimes de direitos de propriedade favorecem certas atividades em detrimento de outras. No caso dos recursos hídricos na península italiana, a privatização dos recursos hídricos foi bastante benéfica para a

⁸⁴ Squatriti (1998), pp. 67-76.

⁸⁵ Squatriti (1998), p. 76-90.

produção de bens privados na indústria pesqueira e de moinhos de água, mas foi prejudicial à provisão de diversos bens públicos (ou redução de externalidades negativas) como navegação, controle de cheias e provisão de água. A lei romana, por outro lado, proporcionava uma delimitação incerta de direitos de propriedade, afugentando os investimentos privados, mas tinha a qualidade de beneficiar as atividades e usos públicos dos recursos hídricos. A chave, portanto, para o exame do regime de direitos de propriedade mais apropriado é conduzir-se uma análise caso a caso para se determinar quais são as atividades mais importantes para uma dada sociedade num dado momento.

Os conflitos decorrentes da multiplicidade de atributos dos recursos hídricos continuam a desafiar a sociedade até hoje. A necessidade de se priorizar os usos dos recursos hídricos é o desafio que motivou o Brasil a estabelecer a Agência Nacional das Águas e a estabelecer os comitês de bacias hidrográficas. No Brasil, vários estados e a própria União têm cogitado em adotar um sistema de cobrança pelo uso da água para se atribuir os direitos de propriedade sobre os recursos hídricos.⁸⁶ Dentre os maiores problemas na determinação de como atribuir os direitos de propriedade sobre os recursos hídricos está a necessidade de se avaliar os efeitos das inúmeras externalidades associadas a represas de usinas hidrelétricas.⁸⁷

O conflito entre serviços de natureza pública e privada, decorrentes da multiplicidade de atributos dos recursos naturais, não é uma peculiaridade restrita aos recursos hídricos. O uso de terras para agricultura e pastagens também apresenta dificuldades de mesma natureza. O caso do regime de propriedade comum sobre as terras nos arredores das pequenas vilas (*commons*) na Idade Média é um exemplo. A eficiência do regime de propriedade coletiva versus a da propriedade privada apresenta o mesmo tipo de dilema existente no caso dos recursos hídricos. Durante a maior parte da Idade Média o regime de propriedade coletiva era o mais eficiente, pois possibilitava uma diversificação maior da produção agrícola, promovia o compartilhamento de riscos, permitia ganhos de escala, proporcionava coordenação central para lidar com as externalidades envolvidas, e facilitava a implementação da estrutura de governância

⁸⁶ Vasconcelos de Freitas (org.) (1999) e Mendes Thames (org.) (2000).

⁸⁷ McCully (1996).

mais adequada para se gerenciar a mão-de-obra.⁸⁸ Somente quando o ritmo de inovação tecnológica acelerou-se tornando mais importante a experimentação e implementação de novas técnicas, o regime de propriedade privada tornou-se mais eficiente.

Isso ilustra como a atribuição de direitos de propriedade determina (ou, pelo menos, influencia fortemente) as formas como os recursos naturais são empregados, afetando assim o desenvolvimento econômico.

3.2 A origem autônoma dos recursos naturais: o caso do ciclo da borracha na Amazônia

A origem autônoma dos recursos naturais é outra razão pela qual a atribuição de direitos de propriedade torna-se um elemento determinante no desenvolvimento econômico. Quando atribuição de direitos de propriedade segue o princípio da apropriação, novas descobertas de recursos naturais freqüentemente proporcionam elevadas rendas para os seus proprietários. Essa elevação da renda total pode levar os agentes a adotar um patamar de consumo insustentável no longo prazo. Se a depreciação do capital natural não for acompanhada de uma elevação do capital físico e humano suficiente para manter a capacidade de produção da economia, o desenvolvimento será insustentável. Além disso, é importante que os investimentos sejam reversíveis ou direcionados a setores não dependentes das atividades de exploração de recursos naturais. Quando considera-se uma economia regional, essa vulnerabilidade é ainda maior pois as rendas associadas à exploração dos recursos naturais podem desaparecer repentinamente devido a um choque de oferta decorrente da descoberta de outras fontes de recursos naturais ou devido a um choque de demanda decorrente de inovações tecnológicas que reduzem a demanda pelo recurso natural.

A vulnerabilidade do crescimento econômico a partir da exploração de recursos naturais foi sentida tantas vezes, que passou a ser conhecida como a maldição dos recursos ou, numa formulação mais específica, *Dutch Disease*. O ciclo da borracha na

⁸⁸ Fenoaltea (1991).

Amazônia é um exemplo desse problema. A designação *Dutch disease* deriva-se do fenômeno ocorrido na economia holandesa na década de 1970,⁸⁹ quando a alta lucratividade do setor de exploração de gás natural provocou um declínio nos demais setores de **bens comercializáveis** e sobreinvestimento nos setores de **bens não-comercializáveis**,⁹⁰ tornando a economia extremamente vulnerável a variações no preço internacional do gás natural. O fenômeno encontra-se formalizado em Corden e Neary (1982) e Sachs e Warner (1995).

A maldição dos recursos decorre da apropriação de recursos naturais que apresentam um custo de extração ou cultivo muito inferior ao seu preço de mercado.⁹¹ A taxa de retorno obtida com essa apropriação supera a taxa de retorno de qualquer outro setor comercializável no determinado mercado geográfico, promovendo assim a migração de firmas de outros setores para esse setor e levando a economia a especializar-se na “produção” desse recurso natural. O resultado é uma economia bastante vulnerável a choques de demanda e oferta do recurso natural em questão. Esses choques resultarão em grandes mudanças na renda da economia regional. Havendo custos de ajustamento elevados (i.e. investimentos fixos e irreversíveis), a economia não conseguirá adaptar-se às novas condições após um choque. A vulnerabilidade é exacerbada pelo subinvestimento no setor de bens comercializáveis. O ciclo da borracha na Amazônia ilustra o problema.

3.2.1 A dotação de fatores de produção

O início do ciclo da borracha é marcado pelo aperfeiçoamento do processo de vulcanização da borracha por Charles Goodyear em 1839. A partir daí surgiram inúmeros usos para a borracha na indústria, provocando um crescimento exponencial da demanda por borracha. Dois gêneros de árvores nativas da Amazônia, a *hevea* e a *castiolla*, juntos, respondiam pela maior parte da produção mundial de borracha. Além

⁸⁹ Barham e Comes (1996), pp. 110-3.

⁹⁰ Bens comercializáveis e não-comercializáveis diferem pela distância na qual podem ser economicamente comercializados. Os bens não-comercializáveis são aqueles que não podem ser economicamente supridos de fora da economia em questão. Os fatores determinantes do alcance de comercialização de um bem é o seu custo de transporte, seu grau de perecibilidade, a frequência de transações requerida, entre outros.

⁹¹ O descolamento entre o custo de extração ou cultivo do recurso natural e o preço de mercado ocorre quando o recurso natural é escasso, quando a propriedade sobre ela é concentrada, permitindo a restrição da oferta a fim de elevar os lucros ou quando os custos variam conforme a localidade (neste caso fala-se em rendas infra-marginais).

da abundância dessas seringueiras na Amazônia, a espécie *hevea brasiliensis*, encontrada primordialmente na Amazônia brasileira (ao sul do Rio Amazonas), proporcionava o látex de melhor qualidade para a produção de borracha. O seu preço chegava a ser trinta por cento superior ao da borracha derivada de outras fontes. Dada a sua dotação favorável de seringueiras nativas, a Amazônia tornou-se a fornecedora dominante de borracha até o final da primeira década do século XX.⁹²

Os recursos naturais requeridos para a produção de borracha eram abundantes na Amazônia, mas os fatores trabalho e capital eram escassos. Durante todo o ciclo da borracha a mão-de-obra foi um fator escasso na Amazônia. A população indígena, nativa da região, havia sido dizimada por epidemias trazidas pelos colonizadores e exploradores. As aldeias remanescentes tendiam a ser isoladas, nas profundezas da selva amazônica. A mão-de-obra local consistia basicamente de caboclos que viviam em vilarejos ribeirinhos, mas em número insuficiente para a demanda da indústria da borracha. A maior parte da mão-de-obra empregada nos seringais precisou ser trazida de fora da região através de um custoso processo de recrutamento, instalação e adaptação. Ela era proveniente principalmente do nordeste brasileiro ou de outros países latino-americanos.⁹³

O capital também era um fator de produção escasso. A expansão da oferta de borracha era essencialmente financiada pelas rendas adquiridas com a venda de borracha extraída no período anterior. Isso significa que a expansão seguia um processo pró-cíclico.⁹⁴ O capital investido na infra-estrutura básica do setor e das cidades, que proporcionava os serviços básicos para a indústria da borracha e para a população da região, provinha principalmente do Estado. As verbas do Estado, por sua vez, provinham primordialmente da taxação das exportações de borracha e das importações. Estima-se que os impostos de exportação de borracha representavam cerca de 20% de seu preço.⁹⁵ Nos últimos anos do ciclo da borracha empresas estrangeiras adquiriram grandes concessões de terras na Amazônia, visando a integração vertical da produção de borracha. Elas tentaram promover plantações de

⁹² Barham e Comes (1996), pp. 1 e 30-1.

⁹³ Barham e Comes (1996), pp. 51-3.

⁹⁴ Barham e Comes (1996), pp. 53-4, 72-6, 115-7.

⁹⁵ Barham e Comes (1996), pp. 128-37.

seringais, mas não tiveram sucesso por duas razões: primeiramente, porque o custo da mão-de-obra (e de seu sustento) era muito elevado, comparado ao custo nas plantações do sudeste asiático, e, em segundo lugar, porque o cultivo muito intensivo de seringueiras tornava-as muito vulneráveis às doenças existentes na Amazônia.⁹⁶

A estrutura de governância dominante, que surgiu nesse contexto de escassa mão-de-obra e capital, foi o patronato. Por esse sistema o patrão patrocinava os seringueiros, proporcionando alimentos e utensílios de primeira necessidade de seu armazém, a serem pagos com as vendas de borracha extraída (i.e. vendendo fiado). A borracha era comprada por comerciantes que transportavam a borracha para os grandes centros (Iquitos, Manaus e Belém), onde ela era comercializada pelas casas de exportação para os grandes centros consumidores internacionais. Essa estrutura de governância provou-se ser a mais eficiente para lidar com as condições amazônicas.⁹⁷

3.2.2 A atribuição de direitos de propriedade sobre os recursos naturais

Na indústria de extração da borracha, a atribuição de direitos de propriedade de três recursos naturais era fundamental: os rios, que proporcionavam o meio de transporte dominante na região; as terras, que continham as seringueiras das quais era extraído o látex; e o látex, do qual se produzia a borracha.

Os rios proporcionavam a principal via de transporte na região. Eles eram mantidos sob a guarda do Estado, que garantia o livre acesso a toda e qualquer embarcação na região. Não havia a cobrança de pedágio ou qualquer outro controle das embarcações que ingressavam nos rios da região.⁹⁸

A borracha era produzida a partir do látex. O látex era considerado um bem privado pertencente ao responsável por sua extração. A extração do látex pode ser realizada de duas formas. O látex de árvores do gênero *castiolla* (existentes primordialmente ao norte do rio Amazonas) é obtido derrubando-se as árvores e drenando-as. O seu látex é coagulado utilizando-se sabão. Essa forma de extração de látex pode ser realizada em qualquer época do ano. Ela requer uma exploração

⁹⁶ Barham e Comes (1996), pp. 58-61, 80-5, 106.

⁹⁷ Barham e Comes (1996), pp. 61-71.

⁹⁸ Barham e Comes (1996), p. 55.

constante de novas áreas, pois a extração necessariamente requer a derrubada da árvore. Em contraste, a extração do latex de árvores do gênero *hevea* é obtida pelo esvaziamento por punção regular das árvores. Neste caso, a extração de látex, desde que realizada propriamente, não prejudica a árvore, permitindo a extração indefinidamente. Essa forma de extração somente pode ser realizada durante um período de baixa dos rios (cerca de seis meses por ano). O látex recolhido por esse processo é curado com fumaça.⁹⁹

A propriedade sobre a terra não era muito relevante para o *caucheros*, como eram conhecidos os extratores da borracha das árvores do gênero *castiolla*. Os *caucheros* exploravam as terras de domínio público sem a preocupação de obter direitos de propriedade, pois não era necessário realizar investimentos fixos no local. A extração das árvores do gênero *hevea*, entretanto, requeria investimentos significativos, como a construção de cabanas para os trabalhadores, de armazém para suprir os produtos de subsistência para os trabalhadores e de “estradas” (trilhas ligando as seringueiras no terreno). Esse investimento eram custos fixos e irreversíveis no terreno, tornando essencial a obtenção de direitos de propriedade.¹⁰⁰

A atribuição de direitos de propriedade sobre as terras era realizada primordialmente pelo regime de concessões. Direitos de posseiros também eram reconhecidos, pelo menos até que estruturas mais formais de propriedade de terra fossem estabelecidas na região. Os impostos sobre a posse de terras tendiam a ser baixos ou nulos e a concessão de terras geralmente era gratuita ou a baixo custo. Havia uma grande diversidade de formas de propriedade de terra. Próximo às grandes cidades predominavam as pequenas propriedades, enquanto nas partes mais remotas dos rios predominavam as grandes.¹⁰¹

O regime de propriedade também inclui o sistema de tributação do Estado. No ciclo da borracha, os tributos sobre a comercialização da borracha eram muito importantes. No Pará e Amazonas as taxas sobre as exportações chegavam a 20% do

⁹⁹ Barham e Comes (1996), pp. 35-42.

¹⁰⁰ Barham e Comes (1996), pp. 37, 54, 64

¹⁰¹ Barham e Comes (1996), pp. 55-61.

valor das exportações. Os municípios também cobravam taxas de cerca de 2% sobre o valor agregado do produto.¹⁰²

Apesar da elevada taxaço da borracha, não se pode caracterizar a intervenço do Estado como uma extraço parcial da renda dos setores associados à borracha. Os governos do Pará e do Amazonas foram em grande parte cooptados pela indústria da borracha. A maior parte dessas receitas foram direcionadas aos projetos de infraestrutura logística, de transporte e de comercialização da borracha (expansão de portos, subsídio de rotas de barcos a vapor pelos tributários do Rio Amazonas, estaçoes telegráficas e de rádio); e para projetos de infraestrutura urbana voltados às demandas de consumo da burguesia formada pela indústria da borracha (iluminação pública, saneamento, telefonia, bondes elétricos, teatros, escolas e hospitais). Assim, a ação do Estado acabou reforçando a dependência da economia regional em relação à indústria da borracha.¹⁰³

Em suma, pode-se caracterizar o regime de direitos de propriedade sobre os recursos naturais no ciclo da borracha como seguindo essencialmente o princípio da apropriaço. Os recursos naturais de domínio público eram apropriados pelos indivíduos sem ônus ou a um preço muito baixo em relação ao seu valor de mercado, e a renda extraída do setor de borracha pelo Estado era gasta em obras públicas voltadas primordialmente para o setor da borracha, tendo um efeito líquido de manter os direitos de propriedades conforme o princípio da apropriaço.

3.2.3 A maldiço dos recursos

A extraço de borracha era extremamente lucrativa, pois seu preço era muito superior ao seu custo de extraço (desde que não houvesse perdas acima da média decorrentes de doenças, abandono de trabalhadores, ou acidentes na navegaço). Como a disponibilidade de terras amazônicas contendo seringueiras era superior à demanda, a expansço da produço na Amazônia sempre foi realizada através da apropriaço de terras “desocupadas e inativas” em vez de pela intensificaço da produço (ganhos de produtividade).

¹⁰² Barham e Comes (1996), pp.128-30.

¹⁰³ Barham e Comes (1996), pp.133-7.

A maldição dos recursos resultou de um desenvolvimento de uma estrutura econômica distorcida. Os altos retornos decorrentes da captura de rendas derivadas da extração da borracha levaram os agentes a abandonar outros setores de bens comercializáveis para ingressar no lucrativo setor de exploração da borracha. O setor de bens não-comercializáveis na Amazônia também crescia para atender à elevada demanda por bens e serviços de consumo decorrente do aumento da renda. Grande parte dos investimentos nos setores da extração da borracha e na produção de bens e serviços não-comercializáveis envolviam custos fixos e irreversíveis. Os investimentos realizados pelo Estado (principalmente dos estados do Pará e Amazonas) eram direcionados à infra-estrutura associada à indústria da borracha e as grandes áreas urbanas que se desenvolviam impulsionadas pelo crescimento da renda na região. Esses investimentos tornaram a economia muito suscetível a mudanças no preço da borracha.

A partir de 1910, quando a borracha passou a ser cultivada de forma intensiva no leste asiático, o preço mundial da borracha começou a cair, tornando a sua extração ou cultivo na Amazônia pouco rentável. O setor sofreu estagnação, seguida por um rápido declínio. Com a queda da renda oriunda da indústria da borracha, a demanda por bens não-comercializáveis na região também declinou, deprimindo ainda mais a economia. Como a maior parte do investimento em ambos os setores eram irreversíveis ou apresentavam elevados custos de ajustamento setorial ou locacional, as firmas não conseguiram se adaptar às novas condições, levando a economia regional a sofrer uma severa depressão.¹⁰⁴

3.2.4 Reflexões

A maldição dos recursos decorre da fragilidade intrínseca do processo de crescimento econômico baseado na exploração de recursos naturais. Essa fragilidade decorre de três fatores. O **primeiro fator** é que a lucratividade do setor de exploração de recursos naturais deriva-se de rendas extraordinárias (*windfall profits*) derivadas da descoberta e apropriação dos recursos naturais encontrados na natureza. Da mesma forma que uma descoberta de recursos naturais pode repentinamente proporcionar

¹⁰⁴ Barham e Comes (1996), pp. 30-1, 82-8, 119-25.

grandes lucros para os seus proprietários, a descoberta de um substituto pode tornar a sua exploração não-lucrativa. Substitutos para um recurso natural de uma determinada fonte podem surgir da descoberta de outro recurso natural, de outras fontes do mesmo recurso natural, ou de uma inovação tecnológica que substitui parcial ou totalmente o recurso natural por outro insumo. O **segundo fator** é a possibilidade de esgotamento do recurso natural economicamente explorável. Apesar de a maioria dos recursos naturais apresentarem custos de extração ou cultivo convexas (isto é, o custo tende a aumentar a taxas crescentes à medida que o recurso torna-se mais escasso), o que tornaria o seu esgotamento previsível, há situações nas quais o esgotamento pode ocorrer de forma repentina, causando uma ruptura no processo produtivo. O **terceiro fator** é que as externalidades associadas à exploração do recurso natural podem tornar a sua exploração inaceitável.

A vulnerabilidade associada ao crescimento impulsionado pela exploração de recursos naturais torna-se uma ameaça ao desenvolvimento econômico quando o surto de prosperidade provoca um crescimento insustentável do consumo ou um sobreinvestimento em setores dependentes do setor extrativista de forma irreversível ou com elevados custos de ajustamento.

A maldição dos recursos, evidente no caso do ciclo da borracha, não é um evento isolado. Ela ocorreu em outros ciclos econômicos pelos quais a economia brasileira passou como o do ouro, do algodão e da cana-de-açúcar, e continua a afligir economias ainda hoje, conforme relatado em vários estudos recentes.¹⁰⁵

¹⁰⁵ Sachs e Warner (1995) realizam um estudo econométrico para examinar o desempenho do crescimento no período 1971-1989 de países com uma alta proporção da renda decorrente da exploração de recursos naturais em 1971. Esse estudo indica que a dependência de setores de exploração de recursos naturais prejudicou o crescimento desses países. O estudo também propõe uma versão dinâmica do modelo de *Dutch disease* para explicar os resultados. Glyfason, Herbertsson e Zoega (1999a) identificam uma relação negativa entre a importância do setor primário no produto interno do país e a taxa de crescimento, através de um estudo econométrico com dados de *panel* para 125 países no período de 1960 e 1992. Glyfason, Herbertsson e Zoega (1999b) propõe uma versão dinâmica do modelo de *Dutch disease* e confrontam as implicações do modelo com dados da economia da Islândia. Mikesell (1997) examina a experiência de diversos países exportadores de minérios. Poderia-se argumentar que o desmatamento da floresta amazônica da década de oitenta até os meados da década de noventa também era de uma forma da maldição dos recursos (Ozório de Almeida e Campari, 1995). Esse caso da maldição dos recursos é interessante porque ele foi promovido artificialmente, através de um regime de propriedade distorcido por incentivos fiscais, agravado pelos incentivos proporcionados pela instabilidade monetária (com a inflação crescente a posse de terras passou a substituir a moeda como uma forma de reserva de valor).

A adoção de um regime de direitos de propriedade que extrai parte da renda decorrente da exploração de recursos naturais escassos pode reduzir a vulnerabilidade associada a exploração de recursos naturais. Para que o desenvolvimento seja sustentável no longo prazo é necessário que uma proporção das rendas seja direcionada à acumulação de capital físico e humano, para compensar a depreciação do capital natural,¹⁰⁶ e que esses investimentos em capital físico e humano sejam produtivos e não dependentes da indústria de extração dos recursos naturais (em termos do modelo do *Dutch Disease*, isso significaria investimentos nos setores de bens comercializáveis). A indústria do petróleo, por exemplo, demonstra como o Estado tem desenvolvido diversos regimes de propriedade para extrair parte da renda dos exploradores de petróleo; como a política antitruste,¹⁰⁷ impostos, contratos de concessão (e sua renegociações),¹⁰⁸ nacionalização das empresas de petróleo¹⁰⁹ e cartelização entre os países produtores (caso da OPEP);¹¹⁰ mas não tem sido tão bem sucedida no direcionamento desses recursos. Conseqüentemente, a maioria dos países exportadores de petróleo tornou-se extremamente dependente dos preços do petróleo no mercado internacional.¹¹¹ A melhor estratégia para prevenir a maldição dos recursos é adotar um regime de direitos de propriedade que extraia as rendas associadas ao uso de recursos naturais escassos, e investir essas receitas em outros setores.

3.3 Um regime de direitos de propriedade: o caso de patentes na indústria de sementes transgênicas

O desconhecimento com relação às formas como os recursos naturais poderão ser utilizados no futuro é uma das principais razões pelas quais há elevados custos de transação. O avanço tecnológico possibilita novas formas de aproveitamento dos recursos naturais. Um dos desafios na atribuição de direitos de propriedade sobre os

¹⁰⁶ Essa idéia é conhecida na literatura como a Regra de Hartwick.

¹⁰⁷ A dissolução da *Standard Oil* nos EUA foi um dos primeiros casos de aplicação da *Sherman Antitrust Act* de 1890, Yergin (1991), pp. 108-10.

¹⁰⁸ Yergin (1991), pp. 233-7, 269-71, 289-98, 433-7, 445-9, 527-30 e 577-80.

¹⁰⁹ Yergin (1991), pp. 237-43, 271-9, 452-6, 584-5 e 648-52.

¹¹⁰ Yergin (1991), pp. 522-3, 580-2 e 630-6.

¹¹¹ Chalk (1998) analisa a dependência da Venezuela e do Kuwait em relação à indústria do petróleo e conclui que ambos estão numa trajetória insustentável, mas por motivos diferentes.

recursos naturais é o de minimizar o prejuízo ao bem-estar social decorrente dessa assimetria de informações entre a geração presente e a futura.

O sistema de patentes é um regime de direitos de propriedade que busca estimular a pesquisa e desenvolvimento para reduzir o desconhecimento com relação aos usos potenciais dos recursos naturais. O sistema de patentes também adota o critério da descoberta como o seu elemento mais fundamental. O que torna o sistema de patentes singular é o fato de que os direitos de propriedade são delimitados de forma exclusiva e por tempo limitado. O sistema de patentes é interessante porque é um modo de se atribuir direitos de propriedade de forma a se estimular a pesquisa e desenvolvimento, mas ao mesmo tempo resguarda os interesses do bem-estar social, ao permitir a disseminação da descoberta após um determinado período. O sistema de patentes apresenta uma série de problemas e distorções, de modo que essa forma de atribuição de direitos de propriedade deve ser feita de forma criteriosa.¹¹² A indústria de sementes transgênicas constitui um estudo de caso propício para se examinar o sistema de patentes como forma de se atribuir direitos de propriedade sobre recursos naturais.

A indústria da biotecnologia (e, mais especificamente, a de sementes transgênicas) surgiu a partir de uma sentença da Suprema Corte dos Estados Unidos em 1980, segundo a qual, organismos vivos “criados pela mão humana”, isto é, micróbios geneticamente modificados, podiam ser patenteados. Foi o reconhecimento de que a descoberta de genes particulares, que pudessem ser introduzidos em microorganismos de forma beneficiar a sociedade, merecia ser estimulada através da atribuição de direitos de propriedade sob a forma de patentes. Com essa sinalização do judiciário, a pesquisa, que até então era liderada pela academia, passou a ser liderada pelas empresas privadas da indústria de biotecnologia.¹¹³

¹¹² O sistema de patentes originou-se do *Statute of Monopolies* estabelecido no Reino Unido em 1624. Não havia consenso, entretanto, quanto ao benefícios proporcionados pelo sistema de patente na época. Muitos se opunham diretamente ao sistema. Várias associações, inclusive o Parlamento, proporcionavam prêmios a indivíduos que estivessem dispostos a lançar mão dos direitos de patente. A oposição ao sistema de patentes decorria principalmente da constatação de que ele proporcionava uma posição privilegiada ao detentor da patente por um período demasiadamente longo, obstruía novas inovações (semelhantes, mas significativamente superiores a protegida pela patente), impedia a disseminação da inovação, além do fato de que nem sempre a patente era atribuída ao verdadeiro(s) responsável(eis) pela inovação. Ashton (1968), pp. 9-13.

¹¹³ Charles (2001), pp. 10-23.

A descoberta de genes úteis para a atividade humana é um bem público puro. Trata-se de conhecimento que agrega valor a um recurso natural. Nesse caso, a maximização do bem-estar social seria obtida disseminando o conhecimento de forma a tornar o bem público puro disponível a todos. Por outro lado, há a preocupação de recompensar o esforço de pesquisa e desenvolvimento que levou à descoberta e, especialmente, de se estimular a pesquisa e desenvolvimento que levem a outras descobertas. Essa preocupação deriva da busca de maximizar o bem-estar social futuro. Pode ser desejável sacrificar parcialmente o bem-estar presente para obter-se um aumento do bem-estar social futuro. Essa é a justificativa para a lei de patentes.

Geralmente patentes são vistas como a atribuição de direitos de propriedade intelectual, isto é, sobre o conhecimento. É importante ressaltar, entretanto, que freqüentemente o reconhecimento da “propriedade intelectual” também implica uma atribuição implícita de direitos de propriedade sobre recursos naturais. É o caso da indústria de biotecnologia, na qual os direitos de propriedade não são atribuídos somente sobre técnicas utilizadas na engenharia genética, mas também sobre os microorganismos.

3.3.1 Direitos de propriedade estimulam a pesquisa e desenvolvimento

A atribuição de direitos de propriedade sobre combinações de genes úteis à sociedade estimula a pesquisa e o desenvolvimento. Isso pode ser constatado na experiência histórica da indústria de sementes. Trata-se de um experimento natural ocorrido devido às características intrínsecas dos produtos agrícolas.

A maioria das principais safras mundiais é de plantas que se auto-polinizam (como a soja, o trigo, o arroz, por exemplo). Essas plantas tendem a manter as mesmas características de uma safra a outra. Assim, um fazendeiro pode guardar parte de sua safra para o plantio da próxima safra. O milho é uma exceção, no entanto. Os pés de milho tendem a polinizar-se entre si. Isso ocorre porque os órgãos masculino e feminino do milho são relativamente distantes um do outro, de forma que a probabilidade de o órgão feminino ser fecundado pelo pólen de um outro pé é bastante elevada. Essa característica permitiu à indústria de sementes controlar a oferta das

espécies de milho mais produtivas através da comercialização de sementes híbridas (sementes resultantes do cruzamento de duas espécies distintas).

Quando uma semente híbrida se reproduz naturalmente, as sementes resultantes têm uma constituição distinta das originais. Além disso, se as sementes resultantes de uma safra de milho híbrido forem plantadas, a colheita tende a ser menor. Quando a diferença na produtividade é suficiente elevada, o fazendeiro dispõe-se a comprar as sementes híbridas para plantio a cada safra. De semelhante modo, o cruzamento do híbrido de milho com outras espécies não traz resultados consistentes, dificultando a produção de espécies semelhantes pelos concorrentes. Essa característica natural do milho levou a indústria de sementes de milho a se desenvolver de forma distinta de todas as outras culturas. Enquanto o resto da indústria de sementes tradicionalmente era classificada como uma prestadora de serviços, porque o que mantinha a indústria era essencialmente o serviço de limpeza, armazenamento e testagem de sementes, a indústria de sementes de milho híbrido obtinha lucros significativos, que sustentavam grandes projetos de pesquisa e desenvolvimento. Empresas privadas no ramo de milho híbrido, como a Pioneer, desenvolveram-se a ponto de levar os centros de pesquisa universitária norte-americanas a abandonarem seus programas de pesquisa com sementes de milho porque não conseguiam acompanhar os avanços das empresas privadas. Isso demonstra que a atribuição de direitos de propriedade sobre recursos naturais tende a acelerar a pesquisa e desenvolvimento, aumentando a produtividade da economia.¹¹⁴

O congresso norte-americano reconheceu os avanços obtidos na indústria de sementes híbridas de milho e tentou reproduzir as mesmas condições em outras culturas com uma lei em 1970 (*Plant Variety Protection Act*). A nova lei atribuía direitos de propriedade exclusivos sobre novas espécies de plantas. O primeiro teste para a nova lei foi uma variedade de soja significativamente superior às demais, a Asgrow 3127. A lei não foi eficaz, entretanto. Os concorrentes logo cruzaram espécies próprias com a nova variedade, obtendo sementes com características semelhantes às da Asgrow 3127 (sem ferir a lei). A oferta pelas concorrentes logo pressionou os preços das sementes para baixo. Além disso –e mais importante– os fazendeiros podiam resguardar parte de

¹¹⁴ Charles (2001), pp. 110-3, 117, 197-8 e 279.

sua colheita para o plantio da próxima safra, diminuindo significativamente a demanda pela semente. Conseqüentemente, os investimentos no segmento de soja nunca alcançaram os níveis obtidos na cultura do milho híbrido.¹¹⁵

3.3.2 Patentes são instrumentos imperfeitos

A atribuição de direitos de propriedade através da outorga de patentes estimula a pesquisa e desenvolvimento, mas será que os benefícios desse estímulo são suficientes para se justificar a perda de bem-estar decorrente da restrição imposta sobre a disseminação da inovação? É importante reconhecer que a patente é um instrumento tosco: a recompensa dada através de patentes não é proporcional aos esforços de pesquisa e desenvolvimento, freqüentemente ela não é atribuída a todos aqueles que contribuíram para a descoberta e ela incentiva atividades improdutivas com o intuito único de apropriação de rendas (*rent-seeking behavior*). Novamente o estudo do caso da biotecnologia é ilustrativo.

Patentes proporcionam retornos assimétricos

A primeira importante patente atribuída na indústria de biotecnologia foi para a descoberta da bactéria *Agrobacterium Tumefaciens*. Essa bactéria causa tumores em plantas, que modificam de forma permanente as células infectadas. Essas mudanças permanentes nas células infectadas pelo *Agrobacterium Tumefaciens* decorrem da transferência de genes do plasmídeo da bactéria para a planta. Essa descoberta, junto com o desenvolvimento de uma técnica que permitia a inserção (*splicing*) de genes estranhos em bactérias, tornava possível a introdução de genes em plantas. Três grupos distintos trabalhavam simultaneamente nessa descoberta: Jeff Schell e Mark van Montagu da Universidade Autônoma de Ghent na Bélgica; Mary-Dell Chilton,¹¹⁶ Eugene Nester e Milton Gordon da Universidade de Washington em Seattle, EUA; e os engenheiros industriais da empresa Monsanto, que até então atuava primordialmente na indústria agroquímica. Os três grupos não haviam trabalhado isoladamente. Havia considerável colaboração entre as partes e em mais de uma ocasião cientistas das universidades belga e americana prestaram consultoria para a Monsanto. Os três grupos submeteram os pedidos de patente às autoridades competentes nos Estados

¹¹⁵ Charles (2001), pp. 98-100 e 111.

¹¹⁶ Mais tarde Mary-Dell Chilton transferiu-se para a Universidade de Washington em St. Louis de onde avançou a pesquisa.

Unidos e na Europa com apenas alguns dias de diferença. Na Europa, a patente foi atribuída aos cientistas belgas pelo fato de eles terem submetido o pedido primeiro. Nos Estados Unidos a tomada de decisão já perdura por mais de 18 anos, devido à dificuldade de se determinar quem foi o primeiro a descobrir que a *Agrobacterium Tumefaciens* poderia ser utilizada para introduzir genes em plantas. Como diz Charles:

Quem pode descrever a trajetória de uma idéia em movimento? As idéias se movem no ritmo da conversação e na velocidade da imaginação humana.¹¹⁷

O episódio demonstra quão arbitrária pode ser a atribuição de direitos de propriedade a partir do conceito da descoberta, e, no entanto, essa atribuição pode definir o rumo de centenas de milhões de dólares.¹¹⁸

Essa progressão simultânea da pesquisa e desenvolvimento não é incomum, mesmo quando não há intercâmbio entre pesquisadores. A situação se repete com frequência. Conforme o historiador de tecnologia, Donald Cardwell, invenções simultâneas e independentes não são nada implausíveis:

Quando duas ou mais sociedades atingem aproximadamente o mesmo patamar de habilidade técnica, a combinação de desejos, oportunidades e estímulos proporcionados pelo comércio, indústria, administração e aprendizado tornam cada vez mais provável que as mesmas coisas sejam inventadas simultaneamente e independentemente em cada sociedade.¹¹⁹

Outro caso controverso foi a introdução da bactéria *Bacillus thuringiensis* (BT) em plantas. Tratava-se da introdução de um único gene, que prometia resultados dramáticos. A bactéria havia sido identificada pelos japoneses em 1901 como a responsável por uma epidemia que atingiu os bichos-da-seda no país. Havia várias espécies de bactéria *Bacillus* que, pelo menos teoricamente, permitiriam o combate de uma série de pragas que prejudicavam várias culturas. Pesquisadores da Universidade de Würzburg, na Alemanha, descobriram a *BT tenebrionis*, que combatia uma série de pragas que atingiam o milho, tomate, batata, algodão e tabaco. Se fosse possível introduzir esse gene em plantas, essas plantas se tornariam não atrativas ou mesmo venenosas para as pragas, e os fazendeiros teriam um ganho de produtividade na

¹¹⁷ Charles (2001), p. 80 (tradução do autor).

¹¹⁸ Charles (2001), pp. 10 e 20.

¹¹⁹ Cardwell (1995), p. 56.

lavoura, ao mesmo tempo em que reduziriam os seus gastos com pesticidas.¹²⁰ Houve uma corrida acirrada para introduzir a *BT* em plantas.¹²¹ A patente pela introdução de *BT* em tabaco foi atribuída à empresa Plant Genetic Systems, mas não sem controvérsias, sendo que mesmo após dez anos tal patente ainda é contestada na justiça.¹²²

Patentes inibem a colaboração entre entidades

A outorga de patentes estimula a pesquisa e desenvolvimento, mas, por outro lado, ela corrói o espírito de colaboração entre entidades.¹²³ Com o regime de patentes a pesquisa por parte das empresas de biotecnologia logo passou a dominar a área, relegando a pesquisa acadêmica a um segundo plano. A supremacia das empresas sobre a academia decorre do fato de que as empresas tendem a ter uma capacidade financeira maior, a atender às necessidades de pesquisa mais rapidamente, a empreender um esforço mais interdisciplinar e a concentrar os esforços nas atividades mais promissoras, evitando questões de interesse mas sem valor comercial.¹²⁴ Por outro lado, a pesquisa e desenvolvimento requer muita experimentação. Tentativa e erro são partes inescapáveis do processo. O compartilhamento dessas experiências entre pesquisadores facilita e acelera o processo de descoberta e inovação. No entanto, o regime de patentes tende a reduzir essa interação entre diferentes entidades. A colaboração entre pesquisadores de empresas de biotecnologia e pesquisadores e cientistas fora da empresa tende a ser bastante restrita. Veja, por exemplo, as restrições às quais os pesquisadores da Monsanto eram submetidos: cada página de anotações de experimentos de laboratoriais tinha que ser datada e assinada pelo cientista diante de uma testemunha, a publicação de resultados de pesquisa em revistas acadêmicas era desencorajada e tinha que ser previamente aprovada pelo departamento jurídico da empresa, e cada etapa de pesquisa requeria o preenchimento de formulários para a

¹²⁰ Charles (2001), pp. 42-6.

¹²¹ Pelo menos cinco entidades pesquisavam simultaneamente como introduzir a *BT* em plantas: Wayne Barnes, cientista da Universidade de Washington em St. Louis; e cinco empresas de biotecnologia: a Agracetus, a Agrigenetics, a Ciba-Geigy, a Plant Genetic Systems e a Monsanto (Charles, 2001, pp. 42-6).

¹²² Charles (2001), pp. 44-5, 49-50.

¹²³ Alguns cientistas confessam que dentro de uma empresa há mais colaboração do que na academia porque não há aquele constante agravante de se definir quem vai receber o crédito por uma idéia (Charles, 2001, p. 32).

¹²⁴ Charles (2001), pp. 34-5, 38,-40, 43, 46.

agência de patentes.¹²⁵ Portanto, enquanto o regime de patentes estimula a pesquisa e desenvolvimento por parte de empresas privadas, ela prejudica o espírito colaborativo da pesquisa acadêmica.

Patentes favorecem atividades especulativas e não produtivas

Após a descoberta de *como* introduzir novos genes em plantas, o grande desafio passava a ser o de se achar *quais* genes introduzir em plantas. Assim como as terras ou o petróleo foram consideradas “o recurso estratégico” no passado, o DNA passava a ser “o recurso estratégico” na “era da biotecnologia”. O reconhecimento de pedidos de patentes sobre microorganismos provocou uma corrida especulativa para a obtenção de direitos de propriedade sobre todos os genes que potencialmente pudessem vir a ter algum valor comercial. Essa estratégia era explicitamente adotada pela empresa de biotecnologia Mycogen. O diretor da empresa, Jerry Caulder, comparava a indústria de biotecnologia aos primórdios da indústria ferroviária nos EUA. Inicialmente os lucros das empresas de transporte ferroviário norte-americanas não advinham do transporte de passageiros e mercadorias, mas da apreciação das terras adjacentes às estradas de ferro. De forma semelhante, a Mycogen buscava obter os direitos de propriedade intelectual sobre todo e qualquer gene que potencialmente pudesse ser útil à indústria de biotecnologia. Tratava-se de uma estratégia visando lucros rápidos numa indústria que prometia retornos ao investimento somente no médio a longo prazo.¹²⁶

Essa corrida especulativa é uma distorção, resultante do sistema de patentes, que é difícil de ser eliminada. É muito difícil distinguir os pedidos de patentes que envolvem de descobertas genuínas, resultantes de um esforço de pesquisa intencional, dos pedidos de patente meramente especulativos, visando obter uma reserva de mercado. Esse último caso é uma atividade não-produtiva, visando unicamente a apropriação de rendas.¹²⁷

¹²⁵ Charles (2001), p. 20.

¹²⁶ A extensão da ganância pelos lucros rápidos da Mycogen é refletida pela sua “descoberta” do *Bacillus thuringiensis san diego*. A Mycogen chegou a patentear esse gene nos EUA, mas renunciou à patente após anos de litigação. O gene havia sido roubado. O gene era o *Bacillus thuringiensis tenebrionis*, descoberto e patentado pelo laboratório alemão Novo Nordisk. Charles (2001), pp. 47-9.

¹²⁷ Charles (2001), pp. 100, 293-6.

Patentes reduzem o compartilhamento do excedente

Um dos primeiros sucessos da indústria de biotecnologia foi a introdução de genes de uma bactéria resistente a certos herbicidas. A Monsanto foi a primeira a obter sucesso comercial com plantas transgênicas resistentes a herbicidas. Antes de se obter sucesso na indústria da biotecnologia, o produto-chave da Monsanto era o herbicida Roundup. Esse herbicida, à base de glifosato (*glyphosate*), é extremamente eficaz. Com uma simples aplicação todas ervas daninhas são rapidamente eliminadas, ou, como dizem os agricultores, o Roundup “queima” as ervas daninhas. Além disso, esse herbicida logo se desintegra, o que significa que o seu impacto ambiental é baixo. Esse herbicida é muito usado, particularmente na cultura da soja, para permitir o plantio direto, sem a necessidade de se arar a terra. Após quase uma década de trabalho, a Monsanto descobriu uma bactéria resistente ao glifosato e conseguiu transferir os seus genes à soja, e mais tarde para o milho. Com isso, a Monsanto lançou as sementes Roundup Ready. Essas sementes transgênicas permitiam o uso do herbicida, mesmo depois do plantio, para manter a lavoura totalmente livre de ervas daninhas. O sucesso foi imediato.

A estratégia da Monsanto era a de tornar-se a “Microsoft da indústria de sementes”. As empresas de sementes continuariam fabricando o *hardware*, as sementes, e a Monsanto ofereceria o *software*, seus genes especiais. A idéia surgia da experiência anterior de Robert Shapiro, executivo da Monsanto. Shapiro havia liderado uma pequena empresa de adoçante na negociação de um contrato de suprimento para a Coca-Cola Light. Uma das exigências de Shapiro havia sido de que cada embalagem de refrigerante contendo o adoçante teria que conter o logotipo da empresa. Esse pequena cláusula, somada a uma boa campanha publicitária, transformou a pequena empresa na mundialmente conhecida Nutrasweet. Shapiro desejava repetir a façanha na indústria de sementes, exigindo que cada saca de semente contendo os genes da Monsanto tivesse as palavras “Roundup Ready” adicionadas à marca da semente.¹²⁸

Para maximizar a apropriação do excedente proporcionado por suas inovações e descobertas, licenciando os seus genes patenteados diretamente a cada fazendeiro (em vez de para as empresas de sementes), a Monsanto calculava que ela conseguiria

¹²⁸ Charles (2001), pp. 110 e 114.

apropriar-se de uma fatia maior do excedente proporcionado por suas inovações e descobertas.¹²⁹ As empresas de semente venderiam as suas sementes com ou sem os genes da Monsanto. As sementes com os genes da Monsanto seriam vendidas pelo mesmo preço que as sem os genes, mas teriam uma “taxa de tecnologia” que seria acrescentada e paga diretamente à Monsanto. Além disso, ao comprar as sementes Roundup Ready o fazendeiro seria obrigado a assinar um contrato que proibia explicitamente o replantio da produção, sujeitando o fazendeiro a multas elevadas em caso de rompimento do contrato. Junto com o lançamento do Roundup Ready houve uma campanha publicitária promovendo o combate à pirataria de sementes (inclusive um disque-denúncia).¹³⁰ A Monsanto também tentou, mas sem sucesso, introduzir uma lei no estado de Ohio, que colocaria o Estado na incumbência de fiscalizar as instalações de limpeza de sementes, para evitar o replantio de sementes protegidas pela lei de patentes ou pela *Plant Variety Protection Act*.¹³¹

A Monsanto foi bem sucedida na extração do excedente gerado por suas inovações. Isso numa indústria que sempre havia repartido os ganhos de produtividade generosamente com o consumidor. A Pioneer, por exemplo, tipicamente apropriava-se de cerca de um quarto do ganho de produtividade alcançado por cada nova geração de sementes de milho híbrido.¹³²

A apropriação do excedente obtido com a inovação poderia ser ainda maior se progresso fosse obtido no gene conhecido como o *Terminator*. Esse gene, quando introduzido numa planta, geraria safras de sementes incapazes de germinar, assim garantindo o controle total sobre as novas espécies de sementes pelas empresas de sementes.¹³³

O reconhecimento de patentes na indústria de biotecnologia impulsionou a indústria e os gastos em pesquisa e desenvolvimento, porém elas têm gerado uma rejeição junto ao público que pode minar avanços futuros. A razão para isso está no

¹²⁹ Infelizmente para a Monsanto, ela só adotou essa estratégia após ter vendido os direitos de uso de seus genes à Pioneer (Charles, 2001, pp. 120-1).

¹³⁰ Charles (2001), pp.151-5, 178 e 185-91.

¹³¹ Charles (2001), pp. 190-1.

¹³² Charles (2001), p. 119.

¹³³ Charles (2001), p. 219.

fato de que a patente permitiu a apropriação de quase todo o excedente pelo produtor. O consumidor, por sua vez, não observa benefícios significativos advindos da indústria de biotecnologia, mas percebe riscos potenciais. Na indústria farmacêutica, por exemplo, as inovações, mesmo quando a empresa detentora age de forma monopolística, extraindo todo o excedente obtido pela inovação, o consumidor beneficia-se de um novo produto, antes inexistente. Na indústria de biotecnologia, entretanto, o benefício é um ganho de produtividade, logo, se o detentor da patente extrair a maior parte do excedente, o consumidor não sentirá o benefício da inovação enquanto a patente perdurar.

O risco percebido pelo consumidor na indústria de sementes transgênicas tende a ser superestimado. Estudos científicos indicam que o risco associado ao uso de plantas transgênicas é baixo. Na ausência de benefícios tangíveis,¹³⁴ o consumidor não requer muito para ser persuadido a rejeitar uma nova tecnologia.¹³⁵ Isso explica o elevado nível de rejeição às sementes transgênicas que ameaça não só o futuro do desenvolvimento da indústria de biotecnologia, mas até a exploração dos avanços já alcançados.¹³⁶

Vários países já baniram a presença de plantas transgênicas na alimentação e vários estão impondo a obrigação de se diferenciar o produto transgênico do resto da lavoura. Isso requeriria a construção de uma rede de processamento, armazenamento e distribuição separada, o que poderia tornar o cultivo de plantas transgênicas anti-econômico.¹³⁷ O sistema de patentes, no caso da biotecnologia, tem minado o avanço da indústria, ao reduzir a repartição inicial dos benefícios da inovação com o consumidor, o que diminui a receptividade do público às inovações proporcionadas pela indústria.

¹³⁴ Os ganhos de eficiência proporcionados pelas sementes transgênicas não são visíveis ao consumidor pois a maior parte dos ganhos de produtividade foram apropriados pelos produtores (dentre os quais destaca-se a Monsanto).

¹³⁵ Charles (2001), pp. 223-5, 250, 304-5.

¹³⁶ Várias áreas pesquisadas pela indústria de biotecnologia que prometiam grandes benefícios à sociedade, já foram abandonadas devido à aversão do público a alimentos transgênicos, como o milho doce (*sweet corn*) e a batata com o gene *BT*, apesar de serem algumas das safras que proporcionariam alguns dos maiores benefícios (Charles, 2001, p. 251).

¹³⁷ Charles (2001), pp. 163-4, 203, 207-8, 252-8, 284-6, 313.

Patentes favorecem a concentração de mercado

A Monsanto foi bem sucedida na extração da maior parte do excedente gerado pelas suas inovações, mas não conseguiu implementar a sua estratégia como gostaria. A Monsanto não se tornou a Microsoft da indústria de sementes. Ao contrário da Microsoft, a Monsanto logo defrontou-se com um nível significativo de concorrência. A Monsanto sofria a concorrência da Pioneer, que havia obtido os direitos de uso de seus genes Roundup Ready e *BT*. A Monsanto havia vendido os direitos de uso desses genes à Pioneer a um preço que –após a materialização do seu sucesso– provou ser demasiadamente barato. O principal produto da Monsanto, as sementes Roundup Ready, também passou a sofrer a concorrência das sementes LibertyLink da AgrEvo,¹³⁸ da DuPont¹³⁹ e do algodão BXN da Calgene (algodão resistente ao pesticida Buctril). Já o milho *BT* da Monsanto passou a sofrer a concorrência da Mycogen e da Ciba-Geigy, que tinham a sua própria versão de milho *BT*.¹⁴⁰ Para proteger-se da concorrência, a Monsanto entrou no segmento de produção de sementes.

A entrada da Monsanto no mercado de sementes foi marcada pela compra de parte significativa da DeKalb, uma das maiores empresas no ramo, depois da Pioneer. A parceria com a DeKalb era estratégica não só pela posição da firma no mercado de milho mas também porque ela detinha a patente sobre várias técnicas de engenharia genética aplicadas ao milho. Em seguida, iniciou uma agressiva sequência de aquisições, que tornaram a Monsanto a segunda maior empresa de sementes no mundo. Ela comprou os ramos de soja e milho da Asgrow; a Foundation Seeds, pertencente a Ron Holden, responsável pelo fornecimento de novos híbridos para cerca de 40% do mercado de milho norte-americano; a Plant Breeding International, principal empresa de sementes da Grã-Bretanha; a Cargil, grande supridora de sementes na Ásia, África, Europa e América Latina; e, mais tarde, adquiriu o controle integral da DeKalb, e a Delta and Pine Land Company,¹⁴¹ detentora de cerca de setenta por cento do mercado de

¹³⁸ A AgrEvo pertence ao conglomerado alemão Hoechst. O LibertyLink é muito semelhante ao Roundup Ready, sendo uma semente transgênica resistente ao herbicida Bialaphos. Charles (2001), pp. 61-2 e 68-72.

¹³⁹ A Dupont descobriu uma espécie de soja resistente ao herbicida Synchrony. Ao contrário das sementes da Monsanto e AgrEvo, entretanto, essa espécie não foi resultado da inserção de genes estranhos à soja, mas, através da experimentação com espécies geradas aleatoriamente através de mutações induzidas por processo químico. Charles (2001), p. 257.

¹⁴⁰ Charles (2001), pp. 110-1 e 124-5.

¹⁴¹ A aquisição do controle da Delta and Pine Land Company pela Monsanto não foi aprovada pelos órgãos de defesa da concorrência norte-americanos e teve que ser vendida.

algodão nos EUA. O objetivo da sequência de aquisições era controlar o acesso ao mercado. Para controlar o acesso às demais firmas de sementes, a Monsanto condicionava a venda de seus produtos por terceiros à restrição de vendas de produtos concorrentes.¹⁴²

Patentes somente são eficazes na medida em que permitem à empresa detentora da patente dominar o mercado, permitindo a restrição da oferta a fim de elevar os preços e recuperar os seus investimentos em pesquisa e desenvolvimento. Uma vez que uma firma torna-se dominante, entretanto, ela tende a canalizar os seus esforços à manutenção e fortalecimento de sua posição dominante. Esses esforços tendem a reduzir a concorrência e a promover dispêndios improdutivos, afetando negativamente o bem-estar social.

3.3.3 Reflexões

O caso da indústria de biotecnologia demonstra que o sistema de patentes incentiva a pesquisa e desenvolvimento, mas também causa uma série de distorções que prejudicam o desenvolvimento econômico. A adoção do sistema de patentes não promove inequivocamente o bem-estar social. O sistema de patentes deve ser empregado criteriosamente.

Uma das lições que pode ser extraída do caso da indústria de biotecnologia é que o sistema de patentes é excelente para o desenvolvimento de novos produtos comercializáveis, mas não tão bom para a pesquisa científica básica. A pesquisa básica é um bem público, e deve ser financiada como tal. Utilizar o regime de patentes para promover a pesquisa básica prejudica o bem-estar social na medida em que reduz a colaboração, restringe a disseminação do conhecimento (durante o período da patente) e limita a pauta de pesquisa a projetos que prometem trazer benefícios comerciais a curto ou médio prazo, em detrimento de projetos de pesquisa de maior importância, mas sem aplicações comerciais imediatas.

Deve haver cautela com relação à adoção do regime de patentes aplicadas a recursos naturais, em contraste a patentes sobre técnicas. Quando se trata de recursos

¹⁴² Charles (2001), pp. 160-1, 195-201, 203

naturais, as patentes devem ser de curto prazo e o escopo¹⁴³ da patente deve ser bem restrito, a fim desencorajar atividades meramente especulativas e improdutivas.

O regime de patentes facilita a formação de empresas dominantes. Quando uma empresa obtém sucesso com um produto patenteado, as rendas desproporcionais ao investimento realizado (*windfall profits*) permitem que a empresa alavanque a sua posição no mercado, através da aquisição de outras empresas e da aquisição de patentes de terceiros. Com isso, a empresa consegue alcançar uma posição de dominância no mercado, tornando práticas anticompetitivas mais tentadoras (rentáveis). Esses efeitos anticompetitivos prejudicam a eficiência dinâmica, objetivo para o qual o regime de patentes foi criado.

3.4 Conclusão

A atribuição de direitos de propriedade pode ocorrer de forma espontânea, com os agentes econômicos se apropriando dos recursos naturais na medida em que os benefícios obtidos pela sua exploração superam os custos de manter o seu controle (princípio da apropriação). Contudo, o emprego dos recursos naturais resultante da aplicação do princípio da apropriação não leva necessariamente à maximização do bem-estar. Além de afetar a distribuição da riqueza, a atribuição dos direitos de propriedade afeta os rumos do desenvolvimento econômico.

A atribuição dos direitos de propriedade afetam o desenvolvimento econômico por causa de duas características intrínsecas dos recursos naturais. As duas características são a sua origem autônoma e a sua multiplicidade de atributos. Essas duas características fazem com que os recursos naturais apresentem elevados custos de transação. Os elevados custos de transação implicam que os agentes econômicos

¹⁴³ O escopo de uma patente refere-se à abrangência de sua aplicação. Um exemplo de uma patente de escopo demasiadamente amplo é a patente dada a Thomas Savery, inventor da primeira máquina de bombeamento de água movida a fogo. A patente abrangia toda máquina que emprega a energia advinda do fogo. Assim, a máquina de fogo Newcomen, inventada logo após a máquina Savery, não pode obter uma patente, apesar de ser uma melhoria significativa (Cardwell, 1995, pp. 118-9, 121-5, 129-30).

precisam determinar como empregar os recursos naturais a partir do seu conhecimento limitado.

Levando-se em conta esses fatos, a sociedade deveria adotar regimes de atribuição de direitos de propriedade de forma consciente, avaliando os custos e benefícios sociais dos diferentes regimes de propriedade. A sociedade ainda se defrontaria com um conhecimento limitado, mas, ao definir um regime de atribuição de direitos de propriedade de forma consciente, a partir de alguns princípios básicos, estaria mais apta a promover a maximização do bem-estar social e o desenvolvimento de forma sustentável.

3.5 Referências

- ALESSI, L. (1990). Development of the Property Rights Approach. *Journal of Institutional and Theoretical Economics* 146: 6-11.
- ASHTON, T. S. (1968). *The Industrial Revolution*. Oxford: Oxford University Press.
- BARHAM, B. L. e COOMES, O. T. (1996). *Prosperity's Promise: The Amazon Rubber Boom and Distorted Economic Development*. (DellPlain Latin American Studies). Boulder: Westview Press.
- BARZEL, Y. (1997). *Economic Analysis of Property Rights* (segunda edição). Cambridge: Cambridge University Press.
- BARZELAY, M. (1986). *The Politicized Market Economy: Alcohol in Brazil's Energy Strategy*. Berkeley, CA: University of California Press.
- BELIK, W. E FEIGE, D. J. (1998). Pro-Alcool in Brazil: The New Phase. *Políticas Agrícolas* 3(1): 5-30.
- BROWN, G. D. (2000). Renewable Natural Resource Management and Use without Markets. *Journal of Economic Literature* 38(4): 875-914.
- CARDWELL, D. (1995). *Wheels, Clocks, and Rockets: A History of Technology*. London: W. W. Norton & Company Ltd.
- CHALK, N. (1998). "Fiscal Sustainability with Non-Renewable Resources." IMF Working Paper. Washington: International Monetary Fund.
- CHARLES, D. (2001). *Lords of the Harvest: Biotech, Big Money and the Future of Food*. Cambridge: Perseus Publishing.
- COASE, R. H. (1960). The Problem of Social Cost. *The Journal of Law & Economics* 3: 1-44.
- COASE, R. H. (1988). *The Firm, The Market and The Law*. Chicago: The University of Chicago Press.
- CORDEN, W. M. e NEARY, J. P. (1982). Booming sector and deindustrialization in a small open economy. *The Economic Journal* 92: 825-848.
- FENOALTEA, S. (1991). "Transaction costs, Whig history and the common fields" em GUSTAFSSON, B. (ed.) (1991). *Power and Economic Institutions*. Hants: Edward Elgar.
- GYLFASON, T.; HERBERTSSON, T. e ZOEGA, G. (1999a). A Mixed Blessing. *Macroeconomic Dynamics* 3: 204-225.

- GYLFASON, T.; HERBERTSSON, T. e ZOEGA, G. (1999b). "Three Symptoms and a Cure: A Contribution to the Economics of the Dutch Disease." Working Paper. Reykjavik: University of Iceland.
- LIBECAP, G. D. (1989). Distributional Issues in Contracting for Property Rights. *Journal of Institutional and Theoretical Economics* 145: 6-24.
- MCCULLY, P. (1996). *Silenced Rivers: The ecology and politics of large dams*. London: Zed Books.
- MENDES THAMES A. C. (org.) (2000). *A cobrança pelo uso da água*. São Paulo: Instituto de Qualificação e Editoração.
- MIKESELL, R. F. (1997). Explaining the resource curse, with special reference to mineral-exporting countries. *Resource Policy* 23(4):191-199.
- NALEBUFF, B. (1997). "On a clear day, you can see the Coase Theorem" em DASGUPTA, P e MÄLER, K-G. (eds.). *The Environment and Emerging Development Issues*. Oxford: Oxford University Press.
- O'BRIEN, P. K. (1996). Path dependency, or why Britain became an industrialized and urbanized economy long before France. *The Economic History Review* 49(2): 213-249.
- OZÓRIO DE ALMEIDA, A. L. e CAMPARI, J. S. (1995). *Sustainable Settlement in the Brazilian Amazon*. Oxford: Oxford University Press.
- SACHS, J. e WARNER, A. M. (1995). "Natural Resource Abundance and Economic Growth". Working Paper Series No. 5398. Cambridge: National Bureau of Economic Research.
- SEROA DA MOTTA, R. (1997). "Desafios Ambientais da Economia Brasileira". Texto para discussão No 509. Rio de Janeiro: IPEA.
- SQUATRITI, P. (1998). *Water and society in early medieval Italy: AD 400-1000*. Cambridge: Cambridge University Press.
- STIGLER, G. J. (1990). *The Theory of Price*. (4th Edition). New York: MacMillan Publishing Company.
- VASCONCELOS DE FREITAS, M. A. (org.) (1999). *O Estado das Águas no Brasil – 1999: Perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos*. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Ministério do Meio Ambiente, Ministério das Minas e Energia.
- YERGIN, D. (1992). *The Prize: The epic quest for oil, money & power*. New York: Touchstone Books.