

Um estudo da difusão do emprego de energia nuclear nos serviços industriais de utilidade pública de eletricidade nos EUA *

Luiz A. Corrêa do Lago **

Francis Tapon ***

Neste artigo estuda-se a difusão do emprego da energia nuclear pelos serviços industriais de utilidade pública de eletricidade regulamentados pelo Governo, nos EUA. Na primeira parte, investiga-se o padrão de difusão da inovação na indústria. Apresenta-se evidência de que a difusão da tecnologia nuclear na indústria de eletricidade regulamentada pelo Governo ocorreu de forma semelhante à verificada no caso da difusão de inovações em setores não sujeitos a restrições governamentais. Na segunda, determina-se a influência de diferentes fatores sobre a rapidez com que as firmas encomendam sua primeira usina nuclear. Verifica-se que muitas das variáveis que influem sobre a velocidade da reação às inovações por parte de empresas do setor privado também desempenham papel destacado no setor da economia que sofre restrições por parte do Governo. Uma constatação importante é a de que a regulamentação pública talvez tenha incentivado inadvertidamente a adoção de usinas nucleares por empresas de geração de eletricidade, no período coberto pela amostra.

1. Introdução; 2. O processo de difusão; 3. Um modelo de difusão entre empresas; 4. Conclusão.

1. Introdução

Segundo Kennedy e Thirlwall (1972, p. 58), existem dois estágios na difusão de uma nova tecnologia: a) o processo da adoção inicial; b) o ritmo de aceitação da

* Os autores agradecem os valiosos comentários feitos pelos Profs. D. A. L. Auld, L. N. Christofides, J. J. McRae e T. H. Naylor. Quaisquer erros que este trabalho apresentar são da inteira responsabilidade dos autores.

** Da Fundação Getúlio Vargas e da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

*** Do Departamento de Economia da Universidade de Guelph, Canadá.

nova tecnologia no seio de determinado setor, ou entre empresas. Este trabalho focaliza a difusão de usinas nucleares num setor,¹ ou seja, a rapidez da difusão da inovação e as razões das diferenças na rapidez de reação de empresas pertencentes ao sistema de geração de energia elétrica nos EUA.

Embora um número crescente de estudos sobre o processo da mudança tecnológica tenha sido elaborado nos últimos anos, estimulado principalmente pelas pesquisas de Mansfield,² são relativamente raros os trabalhos sobre a difusão de mudanças tecnológicas no setor público ou em indústrias regulamentadas pelo Governo. A difusão de uma inovação depende do crescimento da firma inovadora e da velocidade com que esta é imitada por outras. Estes dois fatores atuam indubitavelmente no setor privado onde prevalecem condições mais próximas do mercado livre. Contudo, no setor dos serviços públicos, onde operam tanto empresas estatais quanto empresas privadas regulamentadas pelo Governo, a pressão para inovar pode ser menor do que no setor de concorrência privada, apesar da existência da capacidade para adoção da mudança tecnológica. R. Nelson observa que “em setores públicos ou que não estão voltados para o lucro a expansão do mecanismo inovador está impedida ou muito dificultada. Isto significa que uma inovação desejável não pode propagar-se sem imitação” (1972, p. 51). Um estudo da aquisição de usinas nucleares pela indústria de geração de eletricidade, que é um setor regulamentado, permite testar se é justificada nossa confiança na capacidade do “setor público” de difundir inovações tecnológicas importantes em ritmo bastante rápido.

O presente trabalho obedece à seguinte estrutura: no segundo item, analisamos o padrão pelo qual a inovação se propaga e o comparamos com a difusão de inovações importantes em outras indústrias. No terceiro, procuramos determinar a influência exercida por vários fatores sobre a rapidez com que as empresas encomendam sua primeira usina nuclear. Na conclusão, resumimos os resultados.

2. O processo de difusão

As empresas incluídas em nossa amostra estão relacionadas na tabela 1, a partir da qual foi construída a figura 1, em que plotamos a percentagem de firmas que adotaram a inovação em épocas distintas. Também dividimos as firmas da nossa amostra segundo regiões (de acordo com as categorias fixadas pela Federal Power Commission), e plotamos os dados para as três regiões que contam com o maior número de empresas (essas três regiões abrangem 26 das nossas 34 firmas).

¹ Como vamos abordar uma inovação, não temos como determinar as características que dão a uma firma a liderança tecnológica no que diz respeito a várias inovações, o que diferencia este trabalho do de Mansfield (1968, cap. 7 e 9).

² Veja, por exemplo, David (1971), Globerman (1975), Griliches (1957), Mansfield (1968 e 1971), Romeo (1975 e 1977).

Tabela 1

Empresas da amostra, data do primeiro anúncio e número da região em que estão localizadas *

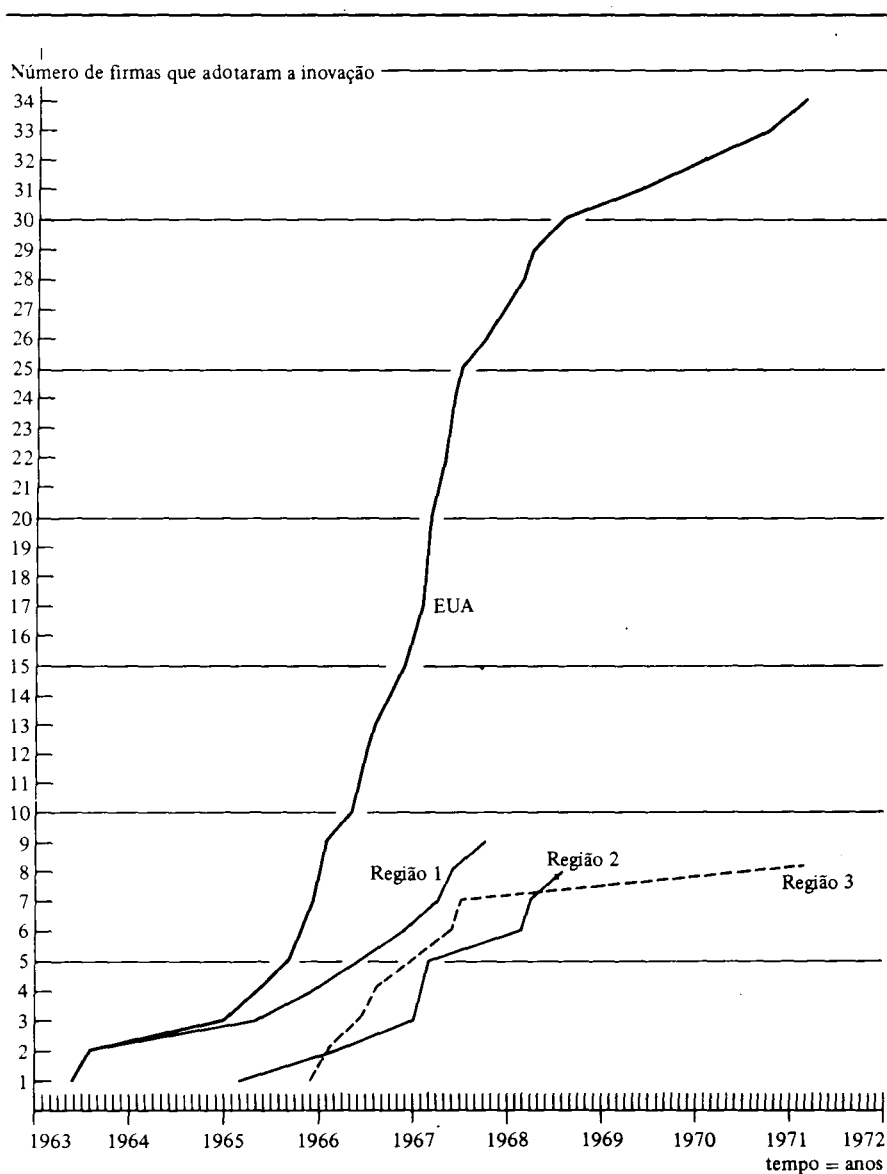
Data	N.º da região	Nome da empresa
5/63	1	Jersey-Central P. & L. Co.
7/63	1	Niagara Mohawk Power Co.
2/65	2	Commonwealth Edison Co.
4/65	1	Long Island Lighting Co.
8/65		Boston Edison Co.
11/65	1	Consolidated Edison Co.
11/65	3	Florida P. & L. Co.
1/66	2	Consumers Power Co. of Michigan
1/66	3	Carolina P. & L. Co.
4/66		Northern States Power Co. (Minn.)
5/66**	1	Philadelphia Electric Co.
6/66	3	Virginia E. & P. Co.
7/66	3	Duke Power Co.
9/66		Pacific G. & E. Co.
11/66	1	Metropolitan Edison Co.
12/66	2	Indiana & Michigan Electric Co.
1/67	2	Northern Indiana Public Service Co.
2/67	3	Florida Power Corp.
2/67**	2	Wisconsin Group (Wisc. Public Service Corp., Wisconsin Power and Light Co., Madison Gas & Electric Co.)
2/67**		Portland General Electric Co.
3/67	1	NY State Electric & Gas Corp.
4/67		Arkansas P. & L. Co.
5/67	3	Baltimore Gas & Electric Co.
5/67	1	Pennsylvania P. & L. Co.
6/67	3	Georgia Power Co.
9/67**	1	Duquesne Light, Ohio Edison, Penn. Power
2/68**		Iowa Electric L. & P. Co., Central Ill. Power Co.
2/68**	2	Toledo Edison, Cleveland Elec. Illuminating Co.
3/68**	2	Cincinnati Gas & Electric Co.
7/68	2	Detroit Edison Co.
5/69		Alabama Power Co.
1/70**		S. California Edison, San Diego Gas & Elec. Co.
9/70		Louisiana P. & L. Co.
2/71	3	South Carolina Electric & Gas Co.

Fonte: US Atomic Energy Commission. *The nuclear industry*. Washington, D.C., 1971; e US Atomic Energy. *Status of central station nuclear power reactors significant milestones*. Washington, D.C., 12 jan. 1971.

* Várias outras empresas foram excluídas da amostra por diversas razões: não foram publicadas estatísticas sobre essas firmas em US Federal Power Commission (1963-1971), por se tratarem de empresas municipais ou de cooperativas. São as seguintes as empresas excluídas: Northeast Utilities, Vermont Yankee Nuclear Power Corporation, Maine Yankee Atomic Power Corporation, Sacramento Municipal Utility District, TVA, Nebraska Public Power District, Washington Public Power Supply System, Power Authority of the State of NY, Puerto Rico Water Resources Authority.

** Várias empresas de geração de eletricidade uniram-se para adquirir uma mesma usina nuclear.

Figura 1
Crescimento no número de empresas que adotaram a inovação
EUA e três regiões norte-americanas selecionadas



* Região 1: Atlântico Médio – nove empresas; Região 2: Centro-Nordeste – oito empresas;
 Região 3: Atlântico Sul – oito empresas.

Nossa amostra inclui apenas empresas que instalaram uma usina nuclear entre 1963 e 1971, o que simplifica a análise e elimina as firmas menores que não são usuárias potenciais da inovação.³ Eliminada esta hipótese, teríamos de encontrar um mecanismo para explicar a percentagem de firmas que não adquiriram usinas nucleares durante o período coberto pelo estudo. Não incluímos empresas que compraram usinas nucleares com capacidade inferior a 600 Mwe por duas razões: a) a escolha da capacidade mínima de 600 Mwe elimina, de fato, pequenas empresas, cujos sistemas não podem absorver usinas desse tamanho;⁴ b) a escolha da capacidade mínima assegura que todas as firmas incluídas na amostra adotaram a inovação em escala bastante grande.⁵ Ao tratar apenas de firmas maiores, podemos garantir que cada uma delas é capaz de utilizar a inovação. Assim, acreditamos que a maior parte das empresas em condições de adotar a nova tecnologia o fizeram entre 1963 e 1971.

Cada empresa é listada uma vez, na época em que divulgou publicamente a aquisição de sua primeira usina nuclear. As empresas de propriedade estatal foram excluídas da amostra, pois assumimos que seus motivos para adotar a tecnologia nuclear podem ser muito diferentes dos das empresas privadas. Várias usinas nucleares adquiridas por empresas de serviços industriais de utilidade pública, e sobre as quais não se conseguiram informações, foram também eliminadas. Essas empresas estão relacionadas na nota de rodapé da tabela 1. Em resumo, nossa amostra compõe-se de 34 firmas sobre as quais obtivemos informações completas.

A figura 1 mostra a relativa rapidez com que o emprego da energia nuclear se difundiu pelas empresas de geração de eletricidade. Apenas nove anos se passaram entre a declaração feita pela Jersey-Central de que iria construir uma usina nuclear em Oyster Creek e a adoção da mesma tecnologia pela South Carolina E. & L. Em comparação, foram necessários 20 ou mais anos para que todas as firmas importantes estudadas por Mansfield (1968, p. 134) adotassem inovações como controle centralizado de tráfego, retardadores de vagões, fornos de coque para produtos derivados e recozimento contínuo. Este cotejo sugere que o tipo de regulamentação à qual estão submetidas as empresas privadas nos serviços industriais de utilidade pública de eletricidade pode inadvertidamente haver influído sobre a rapidez da imitação na adoção da inovação.

³ William Hughes (1971) analisou o fato de que os sistemas de serviços públicos têm de ser grandes, a fim de poderem absorver unidades de tamanho ótimo. Isso se aplica de modo especial a usinas nucleares, que tendem a alcançar a escala ótima a níveis muito mais elevados do que as que utilizam combustíveis fósseis. Hughes sugeriu também que apenas cerca de 10 sistemas, responsáveis por aproximadamente 36% da capacidade geradora total nos EUA, são suficientemente grandes para instalar as novas usinas nucleares de dimensões maiores.

⁴ Incluímos alguns consórcios, nos quais a parte correspondente a uma das firmas pode ser inferior a 600 Mwe. Eles estão indicados por ** na tabela 1.

⁵ A alternativa seria utilizar a data em que a firma adotou inicialmente a inovação, a fim de produzir uma percentagem determinada de seu produto. Esse procedimento não foi seguido por causa da dificuldade em conseguir as informações necessárias.

O processo temporal de adoção de diversas inovações em setores em que competem apenas firmas privadas não sujeitas a regulamentação apresentou a forma de uma curva logística, como fica evidenciado nas fontes já citadas. Como se pode ver na figura 1, a difusão de usinas nucleares parece ter apresentado tendência semelhante. Podemos ampliar a análise anterior mediante a utilização do modelo de Mansfield (1968) do processo de imitação para ajustar curvas logísticas de crescimento aos dados constantes da tabela 1.

A logística tem uma equação da forma:

$$m(t) = \frac{n}{1 + e^{-(a + b t)}} \quad (1)$$

onde

$m(t)$ = número de empresas que adotaram a inovação no tempo t ;

n = número total das empresas na amostra;

a = intercepto da logística que mede a "origem de aceitação". a indica a posição da curva na escala temporal;

b = mede o ritmo de aceitação da inovação;

t = mede o tempo em meses, a partir de maio de 1963.

Os parâmetros da logística podem ser estimados de diversas maneiras.⁶ De acordo com Griliches (1957), Mansfield (1968) e outros, resolvemos dar à logística uma forma linear e calcular seus parâmetros a e b pelo MMQQ (método dos mínimos quadrados). Tomamos logaritmos naturais de ambos os lados da equação (1) e reordenamos os termos. Obtivemos:

$$\log \frac{m(t)}{n - m(t)} = a + b t \quad (2)$$

Obtivemos as seguintes estimativas de MMQQ a partir da equação (2) (os valores de t são apresentados entre parênteses sob as estimativas):

$$\log [m(t) / (n - m(t))] = -3,62 + 0,0815 t$$

$$\bar{R}^2 = 0,9695 \quad (44,876) \quad (53,772)$$

A logística está ajustada aos dados que se referem aproximadamente à transição de 5% até 95% do teto. Em outras palavras, as observações abaixo de 5% e acima de 95% do teto são desprezadas porque ambas as extremidades da logística são assintóticas aos eixos do piso e do teto.

⁶ Veja referências em Griliches (1957, p. 504, nota de rodapé).

Este método é repetido para o cálculo dos parâmetros das curvas logísticas ajustadas às empresas da amostra das regiões 1, 2 e 3:

$$\begin{aligned} \text{Região 1} \quad \log [m(t) / (n - m(t))] &= -2,31 + 0,07211 t \\ \bar{R}^2 &= 0,8518 \quad (18,354) \quad (16,955) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Região 2} \quad \log [m(t) / (n - m(t))] &= -2,52 + 0,1025 t \\ \bar{R}^2 &= 0,9149 \quad (21,61) \quad (20,48) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Região 3} \quad \log [m(t) / (n - m(t))] &= -0,3267 + 0,05066 t \\ \bar{R}^2 &= 0,6289 \quad (1,825) \quad (10,168) \end{aligned}$$

Diferenças nos coeficientes b podem ser interpretadas como diferenças no ritmo da difusão da inovação. Nossos resultados indicam que a equação (1) representa os dados adequadamente. As estimativas de b para as regiões 1 e 2 não parecem ser drasticamente diferentes entre si. A região 3 parece sujeita a influências diferentes. Além disso, nossas estimativas MMQQ são semelhantes às de Mansfield (1968, p. 142) para quatro indústrias e 12 inovações, ou às de Globerman (1975, p. 430) para a indústria de ferramentas do Canadá. Comparações diretas são difíceis, pois esses autores medem o tempo em anos, enquanto nós o fazemos em meses.

Em suma, neste item apresentamos evidência de que a difusão da utilização de energia nuclear numa indústria regulamentada pelo Governo ocorreu de forma similar à da difusão de inovações em setores não sujeitos a restrições. No item seguinte identificamos os principais fatores que parecem responder pelas diferenças na rapidez de reação das firmas em diferentes regiões dos EUA.

3. Um modelo de difusão entre empresas

Para explicar as diferenças na rapidez de reação à inovação por parte das diversas empresas, consideramos fundamentais quatro fatores, os quais têm origem no lado da procura do mercado. Alguns desses fatores foram julgados significativos por Mansfield (1968) e outros autores em seus estudos do processo de difusão nas empresas privadas, em setores não regulamentados. Além desses fatores, é preciso considerar o tipo de regulamentação ao qual as firmas inovadoras vêm-se sujeitas, bem como o seu grau de *rigor*.

A primeira hipótese estipula que, na média, mantendo-se constantes os outros fatores, quanto maior a firma em relação ao montante do investimento, tanto mais

rapidamente adotará a inovação. Isto nos dá uma aproximação (*proxy*) dos recursos financeiros da empresa, isto é, quanto maior a empresa e menor o custo da usina em relação à mesma, tanto mais facilmente ela será capaz de financiar a usina nuclear. Além disso, quanto maior o sistema em questão, tanto mais fácil será para a empresa a utilização da usina nuclear. Hughes ressalta que “uma medida prática do tamanho unitário ótimo para um grande sistema independente, de densidade média a alta, é 7-10% da capacidade total na época da instalação” (1971, p. 55).⁷ Por conseguinte, pode-se esperar que as grandes empresas ou os membros de consórcios adotem a nova tecnologia mais rapidamente do que as empresas menores ou isoladas, ainda mais porque as economias de escala de usinas nucleares são obtidas num nível mais elevado de produção.

A segunda hipótese é a de que quanto mais lucrativa for a inovação para uma empresa, tanto mais rapidamente esta completará sua primeira usina nuclear. Os lucros das empresas de serviços de utilidade pública são regulamentados, a fim de garantir uma justa rentabilidade para os acionistas. Com essa finalidade em mente, as comissões de regulamentação do Governo (*regulatory commissions*) tentam estimar as tendências futuras de custo. Se aumentar a diferença entre o preço dos combustíveis tradicionais (carvão, gás e petróleo) e o combustível nuclear, as empresas terão maior incentivo para substituir as usinas operadas com as fontes tradicionais de energia por usinas nucleares, presumindo-se diferenças constantes nos custos de capital. Afirma-se com frequência que a eletricidade proveniente de usinas nucleares custa cerca de 60% menos do que a proveniente de usinas a óleo, e cerca de 25% menos do que a gerada em usinas a carvão.⁸ Por outro lado, as previsões quanto aos futuros custos do combustível nuclear são provavelmente mais precisas do que as referentes ao petróleo e ao gás, que no caso dos EUA tenderão a ser importados do exterior em volume cada vez maior.

⁷ Note-se que a maioria dos sistemas faz parte de consórcios (por exemplo, o Northeast Power Pool), fator que pode influir de maneira considerável sobre o tamanho da unidade e a época da sua construção.

⁸ Após o incidente da central nuclear de Three Mile Island, em Middletown, Pensilvânia, a afirmativa de que a energia nuclear é barata foi novamente posta em discussão. Os que se opõem à energia nuclear questionam se os custos ocultos de se enfrentarem todos os aspectos desconhecidos associados a essa complexa tecnologia refletem-se realmente no preço. Por exemplo, os investimentos na *extremidade* (*Back-end*) do ciclo do combustível nuclear aplicados ao tratamento do combustível esgotado são significativos, mas seu montante é desconhecido; outros custos futuros com a segurança e proteção das centrais nucleares estão incluídos apenas parcialmente na computação dos custos etc. Portanto, a mensuração do custo real da energia nuclear implica muito mais do que uma simples operação de adição. Podem-se elaborar diversas hipóteses para cobrir os custos não apenas dos reatores, mas, também, de cada etapa do ciclo do combustível nuclear, desde a extração mineral até a eliminação dos resíduos e a desativação de velhas usinas nucleares. Por conseguinte, as estimativas variam enormemente e, embora reconhecendo a relevância desses fatores, não podemos tratar dos mesmos neste artigo. Aumentos recentes no preço do petróleo também tendem a tornar obsoletas as comparações entre as usinas nucleares e as usinas a óleo, citadas no texto, que eram válidas na época em que este trabalho estava em preparação. No entanto, tenderiam a reforçar a vantagem de custo da eletricidade das usinas nucleares.

A terceira hipótese talvez forneça alguma prova empírica de um teorema surpreendente que pode ser derivado de um modelo de Averch-Johnson (A-J).⁹ É fácil provar que, para uma firma sujeita a restrições legais quanto à taxa de rentabilidade que visa maximizar lucros, “o montante ótimo de capital aumenta à medida que diminui a taxa de rentabilidade justa no sentido do custo de capital da firma.”¹⁰ A aquisição de usinas nucleares por sistemas de serviços industriais de utilidade pública representa importante investimento. Pode-se especular se a diferença entre a taxa de rentabilidade permitida sobre a tarifa básica dos serviços e seu custo de capital leva as empresas a adotarem esta nova tecnologia em um ritmo mais rápido do que ocorreria no caso de ausência de restrição à taxa de rentabilidade. Com base nesse teorema, pareceria que as firmas sujeitas a regulamentação, cuja taxa de rentabilidade é fixada num montante próximo ao custo de capital, teriam um ritmo de mudança tecnológica mais rápido do que as firmas para as quais a diferença entre a taxa de rentabilidade justa e o custo de capital for maior. Além disso, esse resultado talvez indique também uma tendenciosidade em favor de equipamento de uso intensivo de capital, no caso de empresas sujeitas a uma restrição obrigatória quanto à taxa de rentabilidade. Um famoso teorema derivado do modelo de A-J propõe que a firma maximizadora de lucros, obrigada a não ter mais do que uma taxa justa de rentabilidade sobre o investimento, adota uma razão capital-combustível maior do que aquela que se mostra eficiente em determinado nível de produção. Isso implica que uma discrepância entre a taxa de rentabilidade permitida e o custo do capital (ou seu substituto) cria uma tendenciosidade no sentido de maior utilização de capital e de maior economia de combustível, quando da decisão de investimento das empresas sujeitas a essa restrição, em confronto com outras empresas de serviços industriais de utilidade pública que não sofrem tal restrição, mas que apresentam o mesmo nível de produção. Como as usinas nucleares são unidades de uso altamente intensivo de capital, esse efeito deveria refletir-se no sinal e na magnitude do coeficiente de regressão parcial da razão entre as taxas de rentabilidade permitidas e o custo de capital.

Não tentamos avaliar o custo de capital das empresas de nossa amostra. Miller e Modigliani (June 1966), em sua análise do custo de capital na indústria de eletricidade, verificaram que suas estimativas seguiam de perto os movimentos do rendimento médio dos títulos do tipo AAA da indústria. Por esta razão, achamos que o rendimento médio dos títulos de AAA publicados pela Moody pode ser usado como uma aproximação do custo de capital.¹¹

Tentamos encontrar evidência empírica do teorema acima citado, mediante a utilização da razão entre as taxas de rentabilidade permitidas sobre a tarifa básica

⁹ Averch-Johnson (Dec. 1962).

¹⁰ Veja Bailey (1972).

¹¹ Esta medida também é utilizada num estudo de Sankar (1972) sobre o comportamento do investimento na indústria de geração de eletricidade nos EUA.

das empresas da amostra e a medida que representa o custo de capital, e mediante a comparação dessa razão com a velocidade com que a empresa adotou sua primeira usina nuclear. Seria de esperar que quanto menor fosse essa razão¹² tanto mais rapidamente as empresas adotariam inovações ou, em outras palavras, tanto menor seria o período (d) até a tomada de decisão. Pode-se, portanto, esperar uma relação positiva entre d e essa razão.

A quarta hipótese estipula que quanto mais acelerado o crescimento das vendas (em kwh) de uma empresa tanto mais curto o seu período de adoção da energia nuclear. A justificativa dessa relação inversa é que uma firma em rápida expansão tem maior necessidade de expandir sua capacidade do que outra que apresenta crescimento mais lento. O aumento das vendas compõe-se de dois fatores: a) crescimento dos kwh vendidos (energia); b) crescimento da *procura máxima* (*peak demand*). Se o crescimento dos kwh vendidos exceder o crescimento da procura máxima (isto é, se o coeficiente anual de carga estiver aumentando), é mais provável a adoção mais rápida da energia nuclear, tendo em vista que as usinas nucleares são usinas de *carga básica* (*base load*) construídas para funcionar mais de 5 mil horas por ano. Usinas *intermediárias* ou de *produção máxima* (em geral a óleo ou gás) são construídas para funcionar na faixa das 500-3 mil horas por ano.

A quinta hipótese é a de que taxas de juros mais altas, mantendo-se os outros fatores constantes, tendem a desencorajar as firmas a tomar empréstimos e investir em novas instalações. Este é um ponto importante, pois usinas de energia nuclear representam um investimento de longa duração, e taxas de juro crescentes afetam de maneira significativa os custos de capital. As empresas precisam atender à procura de energia por parte do público de uma ou de outra maneira. Contudo, elas podem escolher entre diversos tipos de equipamentos para satisfazer as necessidades dos consumidores. Altas taxas de juros podem levá-los a escolher equipamento que represente uso menos intensivo de capital, como usinas a carvão. Existe, portanto, uma relação direta entre o custo dos juros e o tempo que decorre até que a empresa adquira sua primeira usina nuclear. Esta tendência será reforçada se as comissões de regulamentação demorarem a ajustar a taxa de rentabilidade permitida, no sentido de refletir o aumento do custo de endividamento.

Traduzimos essas hipóteses no seguinte modelo:

$$d = A \text{ tamanho } b_{1\pi} b_{2\pi'} b_{3g} b_4 \text{ (taxa de juros) } b_5 e^u \quad (3)$$

¹² Bailey mostrou que, no caso de firmas sujeitas a uma restrição assimétrica quanto à sua taxa de rentabilidade, variações no custo de capital não alteram o nível ótimo do capital utilizado pela firma. Seria de esperar, portanto, que apenas as variações na taxa de rendimento permitida tenham influência sobre d . Veja Bailey (1972, p. 179).

onde

d = número de meses que uma empresa espera antes de anunciar a encomenda de sua primeira usina nuclear; d é contado a partir de maio de 1963¹³ (US Atomic Energy Commission, 1971);

Tamanho = a razão entre o custo da usina e o patrimônio total no ano do primeiro anúncio;¹⁴

π = medida de rentabilidade do investimento. π é a razão entre o custo do combustível tradicional nos anos 1963-71 em diferentes partes dos EUA e o custo do combustível nuclear nos EUA em 1971.¹⁵ Por combustível tradicional entendemos carvão na Nova Inglaterra; carvão na região do Atlântico Médio; carvão no Centro-Nordeste; carvão no Centro-Noroeste; carvão na região do Atlântico Sul; carvão no Centro-Sudeste; gás no Centro-Sudeste; carvão na região das montanhas; e gás na região do Pacífico. Para cada região escolhemos o combustível com maior percentagem de utilização. Informações referentes a esta divisão por região e ano são dadas em Duchesneau (1972);

π' = razão entre a taxa de rentabilidade permitida para o capital investido e a medida (*proxy*) que representa o custo de capital. Os dados referentes às taxas de rentabilidade permitidas correspondem a taxas de rentabilidade efetivas compiladas em relatórios da Federal Power Commission (1963-71).¹⁶ Obtém-se uma aproximação do custo de capital usando-se o rendimento médio publicado pela Moody para títulos do tipo AAA de empresas de serviços públicos;¹⁷

g = taxa de crescimento médio das vendas totais em kwh (energia) nos três anos anteriores.¹⁸ Teria sido ideal computar a razão entre a taxa de crescimento médio das vendas totais em kwh e a taxa de crescimento médio da capacidade geradora total (procura máxima). Contudo, não foi possível obter dados sobre a procura máxima;

Taxa de juros = rendimentos de títulos do Tesouro de três a cinco anos, obtidos de boletins da Federal Reserve, e que representam uma média anual;

¹³ O tempo é contado a partir de maio de 1963, quando o primeiro compromisso de construir uma usina nuclear comercial foi assumido pela Jersey-Central P. & L. Company.

¹⁴ Veja US Atomic Energy Commission (1971) e US Federal Power Commission (1963-71).

¹⁵ Veja Duchesneau (1972).

¹⁶ Bailey (1972, p. 103) observa que: "Às vezes ocorre que a taxa de rentabilidade obtida pela firma ultrapasse o máximo estipulado e que no entanto o órgão regulador não insista em um ajuste do preço a fim de reduzir a rentabilidade. Para fins do modelo (a taxa de rentabilidade permitida) deveria provavelmente ser considerada a taxa justa implicitamente permitida pelo órgão regulador, ao invés da taxa declarada."

¹⁷ Veja Moody (1971).

¹⁸ Veja US Federal Power Commission (1963-71).

u = termo de erro aleatório distribuído normalmente com média zero e variância constante.

A forma funcional adotada é uma aproximação da relação verdadeira e, até certo ponto, é arbitrária.¹⁹ A forma funcional da equação (3) parece bastante razoável. As relações multiplicativas fazem sentido neste contexto porque a influência exercida individualmente sobre d pelas variáveis exógenas provavelmente depende do nível das outras. Por exemplo, diferenças no tamanho das empresas possivelmente seriam menos importantes se a adoção da tecnologia nuclear fosse altamente lucrativa, ou se a taxa de rentabilidade permitida se aproximasse muito do custo de capital da empresa.

Quando tomamos logaritmos naturais em ambos os lados da equação (3), ela pode ser escrita como se segue:

$$\log d = \log A + b_1 \log \text{tamanho} + b_2 \log \pi + b_3 \log \pi' + b_4 \log g + b_5 \log (\text{taxa de juros}) + u \quad (4)$$

É de se esperar que os coeficientes da equação (4) apresentem os seguintes sinais:

$$b_1 > 0, \quad b_2 < 0, \quad b_3 > 0, \quad b_4 < 0, \quad b_5 > 0$$

A equação (4) foi estimada com MMQQ e recalculada utilizando-se a técnica de Cochrane-Orcutt. Os valores das estatísticas t estão registrados entre parênteses abaixo de cada coeficiente.

$$\begin{aligned} \log d = & 0,0753 \log \text{tamanho} - 0,425 \log \pi + 0,642 \log \pi' & (4a) \\ & (0,243) & (2,26)** & (2,55)** \\ & - 0,0168 \log g + & 0,415 \log & (\text{taxa de juros}) \\ & (0,792) & (4,12)** \end{aligned}$$

$$\bar{R}^2 = 0,83$$

$$D-W = 2,16$$

$$n = 34$$

¹⁹ Foram testadas outras formas funcionais para determinar se os resultados eram sensíveis à especificação escolhida. Em primeiro lugar, fizeram-se suposições de que $\log d$ era uma função linear de $\log \text{tamanho}$, π , π' , g e taxa de juros. Em segundo, presumiu-se que $\log d$ era uma função linear das mesmas variáveis, incluindo a elasticidade da procura de eletricidade com relação ao preço. Os resultados foram bastante semelhantes aos indicados neste trabalho, embora em alguns casos alguns dos coeficientes não fossem estatisticamente significantes.

$$\begin{aligned}
 d &= 0,247 \text{ tamanho} - 0,956 \pi + 2,24 \pi' & (4b) \\
 &\quad (1,37) \quad (2,34)** \quad (2,80)** \\
 &- 0,165 g + 7,42 \text{ (taxa de juros)} \\
 &\quad (1,56) \quad (6,46)**
 \end{aligned}$$

$$\bar{R}^2 = 0,95$$

$$D-W = 2,17$$

$$n = 34$$

** = o coeficiente é significativo no nível de 5% num teste bilateral.

Os resultados em geral apóiam as hipóteses anteriormente explicitadas. Em todos os casos, b_1 é positivo, como nossa primeira hipótese leva a esperar. Porém, os coeficientes não são estatisticamente significantes no nível de 5%. As estimativas de b_2 são negativas e estatisticamente significantes no nível de 5%. As estimativas de b_3 são positivas e estatisticamente significantes no nível de 5%. Este resultado reforça a nossa terceira hipótese e fornece certa evidência para uma proposição de Averch-Johnson. Como observa Scherer (1971, p. 535): "É concebível que o rápido crescimento das usinas de geração de eletricidade à base de combustível nuclear na década de 1960 tenha sido incentivado em parte pelo desejo das empresas regulamentadas pelo Governo de viesar sua escolha em favor de equipamentos de uso intensivo de capital." As estimativas de b_4 têm sinal negativo mas não são estatisticamente significantes. As estimativas de b_5 são positivas e estatisticamente significantes. Os sinais dos coeficientes correspondem ao esperado e não mudam quando a especificação da equação (4) é alterada, reforçando nossas hipóteses.

4. Conclusão

Em primeiro lugar, o processo de difusão da energia nuclear nos serviços industriais de utilidade pública sob regulamentação é bastante bem representado pela curva logística de crescimento. Mansfield (1968 e 1971), Griliches (Oct. 1957) e outros obtiveram resultado semelhante em seus estudos da difusão de outras inovações tecnológicas no setor privado não sujeito a regulamentação. Em segundo, é interessante observar que muitas das variáveis que se mostraram significantes para explicar diferenças na velocidade da reação a inovações por parte de empresas no setor privado também desempenharam papel importante no setor regulamentado da economia. Em terceiro, é possível que a regulamentação tenha incentivado inadvertidamente a aquisição de usinas nucleares por empresas de geração de eletricidade no período coberto por nossa amostra. Deve-se notar, no

entanto, que a variável de regulamentação poderia refletir o impacto de fatores ligados à conservação ambiental que não foram levados em consideração, devido à falta de informações disponíveis para o período anterior a 1971 que pudessem servir de base para a construção de uma variável *dummy*. Portanto, a mensuração dos efeitos reais da regulamentação dependeria da verificação do cumprimento efetivo das normas conservacionistas por parte das comissões de regulamentação, que no entanto era certamente bem menos estrito do que na presente década.

Abstract

In this paper, we study the diffusion of nuclear power in the regulated electric utility industry in the United States. In the first part of the paper, we investigate the diffusion pattern of the innovation in the industry. We present evidence that the diffusion of nuclear technology in the public utility industry proceeds in a manner similar to that of the diffusion of other innovations in sectors not subject to public regulation. In the second part, we determine the influence of various factors on the speed with which firms order their first nuclear power plant. We find that many of the variables which influence the speed of response to innovations of firms in the private sector also play a major role in the regulated sector of the economy. An important finding is that regulation may have inadvertently stimulated the adoption of nuclear power plants by electric utilities during the period of time covered by our sample.

Bibliografia

Averch, H. & Johnson, L. Behavior of the firm under regulatory constraint. *American Economic Review*, 52: 1053-69, Dec. 1962.

Bailey, E. E. Economic theory of regulatory constraint. Princeton Univ., 1972. (Tese de doutorado.)

David, P. The Mechanization of reaping in the ante-bellum Midwest. In: Rosenberg, N., ed. *The Economics of Technological Change*. Baltimore, Penguin, 1971. p. 229-73.

Duchesneau, T. D. *Interfuel substitutability in the electric utility sector of the US economy*. Washington, D.C., Feb. 1972. (Federal Trade Commission Report 6-15-15.)

Globerman, S. Technological diffusion in the Canadian Tool and Die Industry. *Review of Economics and Statistics*, 57: 428-34, Nov. 1975.

Griliches, Z. Hybrid Corn: an exploration in the economics of technological change. *Econometrica*, 25: 501-22, Oct. 1957.

Hughes, W. R. Scale frontiers in electric power. In: Capron, W., ed. *Technological change in regulated industries*. Washington, D.C., Brookings Institution, 1971. p. 44-85.

Kennedy, C. & Thirlwall, A. P. Technical progress: a survey. *Economic Journal*, 82: 11-72, Mar. 1972.

Mansfield, E. *Industrial research and technological innovation: an econometric analysis*. New York, W. W. Norton, 1968.

_____ et alii. The Diffusion of a major manufacturing innovation. In: *Research and innovation in the modern corporation*. New York, W. W. Norton, 1971. p. 186-206.

Metcalf, J. S. Diffusion of innovation in the Lancashire textile industry. *Manchester School*, 38: 145-62, June 1970.

Miller, M. H. & Modigliani, F. Some estimates of the cost of capital to the electric utility industry. *American Economic Review*, 56: 331-91, June 1966.

Moody, J. *Statistics on privately-owned public utilities, 1963-1971*. New York, John Moody, 1960-73.

Nelson, R. R. Issues and suggestions for the study of industrial organization in a regime of rapid technical change. In: Fuchs, V. R., ed. *Policy issues and research opportunities in industrial organization*. New York, NBER, 1972.

Office of the TVA. *Comparison of coal-fired and nuclear power plants for TVA system*. Chattanooga, Tenn., June 1966.

Romeo, A. Interindustry and interfirm differences in the rate of diffusion of an innovation. *Review of Economics and Statistics*, 57: 311-9, Aug. 1975.

_____. The Rate of imitation of a capital-embodied process innovation, *Economica*, 44: 63-9, Feb. 1977.

Sankar, U. Investment behavior in the US electric utility industry 1949-68. *The Bell Journal of Economics and Management Sciences*, 3: 645-64, Aug. 1972.

Scherer, F. M. *Industrial market structure and economic performance*. Chicago, Rand McNally, 1971.

Temin, P. A New look at Hunter's hypothesis about the ante-bellum iron industry. In: Rosenberg, N., ed., op. cit. p. 274-83.

US Atomic Energy Commission. *The Nuclear industry*. Washington, D.C., US Government Printing Office, 1971.

US Federal Power Commission. *Statistics of privately-owned electric utilities in the United States*. Washington, D.C., US Government Printing Office, 1963-71.