

**CARBON FUELS FOREVER?**  
**ENTENDENDO O APROFUNDAMENTO DO LOCK-IN NO CARBONO**  
**A PARTIR DE UM ESTUDO SOBRE PATENTES DE PETROLÍFERAS**  
**NUMA ABORDAGEM EVOLUCIONÁRIA**

Guilherme Nascimento Gomes <sup>1</sup>  
Rosana Icassatti Corazza <sup>2</sup>

**Resumo**

Estaríamos aprisionados na era do hidrocarboneto? De que forma? Haveria possibilidades de transitar para um futuro de baixo carbono? Um desafiador debate sobre sistemas energéticos e suas implicações para as sociedades contemporâneas, principalmente as transições de fontes poluentes para fontes de energias renováveis que passam por um processo de descarbonização, esteja capitaneando uma frente avançada da agenda de pesquisa sobre mudanças técnico-econômicas e desenvolvimento. O objetivo desse artigo é apresentar o entendimento do atual processo de aprofundamento da dependência de nossas sociedades em fontes energéticas fósseis, a partir de um estudo sobre patentes de empresas *Carbon Majors* do setor petrolífero, à luz de conceitos oriundos de contribuições teóricas de corte evolucionário em sua matriz neo-Schumpeteriana. O estudo se desenvolve a partir de uma metodologia baseada em Patel e Pavitt (2001) para avaliar as competências tecnológicas das empresas selecionadas. Para a consulta e coleta de dados na base de patentes *Derwent Innovation Index*, utilizou-se o *Green Inventory IPC* (WIPO), no período de 1963-2017. O desenho da pesquisa foi concebido a partir de uma revisão semi-sistemática da literatura especializada sobre as transições energéticas para uma economia de baixo carbono. Os resultados deste trabalho podem servir a uma discussão circunstanciada sobre os caminhos possíveis e desafios correspondentes a serem enfrentados por políticas públicas – e, eventualmente, estratégias corporativas – que se queiram comprometidas com o rompimento do *aprisionamento* da civilização a um padrão de desenvolvimento caracterizado, do ponto de vista energético, por sua dependência em relação aos combustíveis fósseis. Em outras palavras, com relação ao *lock-in* do carbono.

**Palavras-chave**

Análise de patentes, indústria petrolífera, economia de baixo carbono, *lock-in* no carbono

**Abstract**

Would we be imprisoned in the hydrocarbon era? In what way? Would there be possibilities for moving to a low carbon future? A challenging debate about energy systems and their implications for contemporary societies, especially transitions from polluting sources to renewable energy sources undergoing decarbonization, is capturing an advanced front of the research agenda on technical-economic change and development. The purpose of this essay is to present the understanding of the current process of deepening dependency of our society on fossil energy sources, from a study of patent of Carbon Majors companies in the oil sector, in the light of concepts from theoretical contributions of evolutionary approach in its neo Schumpeterian matrix. The study is developed from a methodology based on Patel and Pavitt (2001) to evaluate the technological competencies of the selected companies. The Green Inventory IPC (WIPO) was used for the consultation and data collection in the Derwent Innovation Index, during 1963-2017. The research design was conceived from a semi-systematic review of the specialized literature on energy transitions for a low carbon economy. The results of this work may serve as a detailed discussion of the possible paths and challenges to be faced by public policies - and eventually corporate strategies - that are committed to breaking the trappings of civilization into a pattern of development characterized by energy point of view because of its dependence on fossil fuels. In other words, with regard to carbon lock-in.

**Keywords**

*Patent analysis, oil industry, low carbon economy, carbon lock-in*

**Área ANPEC:** Área 9 - Economia Industrial e da Tecnologia

**JEL codes :** O30, Q35, Q49

---

<sup>1</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Política Científica e Tecnológica do Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. [guilhermegomes@ige.unicamp.br](mailto:guilhermegomes@ige.unicamp.br)

<sup>2</sup> Professora Doutora do Departamento de Política Científica e Tecnológica, do Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. [rcorazza@g.unicamp.br](mailto:rcorazza@g.unicamp.br)

## Introdução

A disponibilidade de energia é condição essencial para o desenvolvimento da vida social e das atividades econômicas. Ao longo da história, as sociedades buscaram fontes energéticas progressivamente mais eficientes – e, a partir da era industrial, com menores custos de produção, de modo a promover a reprodução da vida social.

Quando se fala aqui de “energia” como condição para o desenvolvimento, não se limita à sua disponibilidade em qualidade passível de ser utilizada e em quantidade, em massa crítica de energia, das quais dependem as sociedades contemporâneas. É preciso compreender a energia de forma mais ampla e, por isso, recorre-se aqui ao conceito de “sistemas energéticos antropogênicos” de Smil (2010a). Esses sistemas são quaisquer arranjos por meio dos quais os seres humanos empregam os recursos do planeta para melhorar suas chances de sobrevivência e para a melhoria de sua qualidade de vida. Smil (2010a) observa “e, de forma menos admirável, também para aumentar seu poder individual e coletivo e para dominar, e matar, entre outros” (SMIL, 2010a, p. 1). O autor explica que os sistemas energéticos são formados por três componentes fundamentais: as fontes naturais de energia, suas conversões e a variedade de formas específicas de uso dos fluxos energéticos disponíveis.

As sociedades desenvolveram, desde a pré-história, diferentes sistemas energéticos. Os hominídeos primitivos, coletores, empregavam sua energia somática, resultante da conversão dos alimentos em energia muscular, em atividades que exigiam a caminhada, a corrida, a coleta de alimentos. O uso de energia exossomática teve início há cerca de 800 mil anos, com o *Homo erectus*, pelo domínio do fogo. Graças a isso, novos usos finais foram possíveis, da defesa contra predadores à cocção de alimentos, passando, de forma muito importante, pela construção de utensílios, ferramentas e armas. O autor também observa que, nas sociedades modernas, a energia de muitas fontes naturais é convertida pelo uso de dispositivos progressivamente sofisticados, para uma multiplicidade de propósitos que incluem, sem se a isso se restringir, a produção de alimentos, de medicamentos, de armas, da iluminação de ambientes, de sua climatização, e da produção e acesso a uma variedade crescente de serviços que denotam que a produção e reprodução da vida social passam também por uma esfera simbólica, e não apenas material.

Quando o investigador se debruça sobre mudanças no mundo da energia, com o recurso das diferentes sociedades, a cada momento no tempo, as diferentes fontes primárias de energia, não se trata apenas de se interessar pela composição da matriz primária, por exemplo, de certo país. Interessa, também, compreender os mecanismos conversores de energia – denominados *prime movers* – em sua fonte primária para escalas energéticas que possibilitem os usos finais requeridos pelos agentes socioeconômicos. Além dos conversores, os sistemas energéticos requerem também infraestruturas, cuja construção, operação e manutenção costumam ser muito exigentes em termos de consumo energético.

É possível dizer, evidentemente, que os sistemas energéticos têm custos energéticos – que podem ser monetizados – mas também têm impactos ambientais e sociais, como são os casos de desmatamentos, das mudanças na composição atmosférica (com o aumento de emissões de gases como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e compostos voláteis orgânicos resultantes da queima de combustíveis fósseis), raramente monetizados (SMIL, 2010a, p. 2).

Como o mesmo autor enfatiza, os sistemas energéticos evoluem (SMIL, 2010a). Se na era pré-industrial a oferta primária de energia era dominada por biomassa tradicional (que inclui a lenha, os resíduos de colheitas e excrementos de animais) e o uso de *prime movers*<sup>3</sup> era dominado pelos músculos humanos e de animais, Smil (2010a) observa que mudanças velozes se processaram ao longo dos últimos dois séculos, naquilo que ele chama de “*remarkable energy transitions*” (SMIL, 2010a, p. 2).

As transições energéticas são marcadas, em escala global, por mudanças nas participações relativas de combustíveis individuais – inicialmente o carvão mineral substituiu a biomassa tradicional;

---

<sup>3</sup> Os conversores por vezes são reconhecidos como *prime movers*, que a cada período da história, é transitado e substituído. Os *prime movers* são aparelhos conversores de energia (dispositivos criados pelo ser humano, máquinas e equipamentos) capazes de transformar a energia em sua fonte primária (formas encontradas na natureza) em formas passíveis de utilização pelos consumidores finais. É essa capacidade de converter energia primária e serviços energéticos – luz, calor, força mecânica – que têm possibilitado a produção e a reprodução da nossa vida social, em suas mais diversas atividades sociais e econômicas (SMIL, 2010a).

logo mais, os hidrocarbonetos desempenharam seus papéis, com o petróleo substituindo o carvão e, mais recentemente, com um papel crescente e importante desempenhado pelo gás natural. Essas transições também são marcadas pelo advento da eletricidade, cuja adoção eleva a um nível absolutamente sem precedentes o consumo final de energia pela civilização contemporânea. Novos *prime movers* são colocados em ação, novos conversores permitem a multiplicação quase sem fim de usos finais. Ao fim e ao cabo, as fontes energéticas empregadas globalmente são, de forma absoluta, dominadas pela presença massiva do carvão e dos hidrocarbonetos.

Mas os sistemas energéticos também têm custos – custos energéticos, desde logo, no sentido de que sua concretização material tem necessidades energéticas – que podem ou não ser monetizados. Há custos, também, em termos de seus impactos socioambientais, dentre os quais as mudanças climáticas representam uma parte importante, talvez hoje a face mais conspícua do problema. Embora esses custos poucas vezes sejam monetizados, as perdas sociais, econômicas e ambientais têm mobilizado as negociações climáticas internacionais desde o início da década de 1990 e políticas públicas voltadas à mitigação dos gases de efeito estufa (GEE) e à adaptação das sociedades com relação a seus efeitos (STERN, 2006; IPCC, 2013).

Estaríamos, então, aprisionados na era do hidrocarboneto? De que forma? Haveria possibilidades de transitar para um futuro de baixo carbono?

De fato, como se tem visto, talvez capitaneando uma frente avançada da agenda da pesquisa sobre mudanças técnico-econômicas e desenvolvimento esteja francamente se abrindo, num desafiador debate sobre sistemas energéticos e suas implicações para as sociedades contemporâneas, principalmente as transições de fontes poluentes para fontes de energias renováveis que passam por um processo de descarbonização.

O objetivo desse artigo é apresentar, a partir de um estudo sobre patentes de empresas *Carbon Majors* do setor petrolífero, à luz de conceitos oriundos de contribuições teóricas de corte evolucionário em sua matriz neo-Schumpeteriana, o entendimento do atual processo de aprofundamento da dependência de nossas sociedades em fontes energéticas fósseis. O estudo se desenvolve a partir de uma metodologia baseada em Patel e Pavitt (2001) para avaliar as competências tecnológicas das empresas selecionadas. Para a consulta e coleta de dados na base de patentes *Derwent Innovation Index*, utilizou-se o *Green Inventory IPC* desenvolvido pela organização internacional de patentes (WIPO), no período de 1963-2017. Nesse sentido, busca-se contribuir para a literatura por meio da aplicação de estatísticas de patentes de maneira a evidenciar o reforço das empresas de petróleo e gás em aprofundar *lock-in* do carbono por meio de estratégias e construção de capacitações tecnológicas. O desenho da pesquisa foi concebido a partir de uma revisão semi-sistemática da literatura especializada sobre as transições energéticas para uma economia de baixo carbono.

Os resultados deste trabalho podem servir a uma discussão circunstanciada sobre os caminhos possíveis e desafios correspondentes a serem enfrentados por políticas públicas – e, eventualmente, estratégias corporativas – que se queiram comprometidas com o rompimento do *aprisionamento* da civilização a um padrão de desenvolvimento caracterizado, do ponto de vista energético, por sua dependência em relação aos combustíveis fósseis. Em outras palavras, com relação ao *lock-in* do carbono.

Para se divisar elementos necessários para começar a responder a estas questões, este trabalho está organizado em três seções, além desta introdução e da conclusão. A primeira seção apresenta o conceito de sistemas energéticos e seus principais componentes, a saber, os tipos de uso final da energia em nossas sociedades, as fontes energéticas, as formas de conversão de energia nos diferentes tipos de uso final da energia no cotidiano das sociedades – e, neste momento do texto, o conceito de *prime mover* é fundamental. Além disso, também é apresentado o conceito de transição energética. O propósito desta seção, no escopo deste artigo, é demonstrar como o aprisionamento de nossas sociedades com relação aos combustíveis fósseis não tem apenas uma natureza tecnológica. A compreensão de um sistema energético intensivo nesses combustíveis permite aludir a uma interdependência também sistêmica de nossas sociedades, na medida em que atores socioeconômicos sejam eles consumidores, fornecedores, ou reguladores, contribuem para a produção e a reprodução desse sistema ao longo do tempo.

Essas considerações nos levam ao assunto em pauta na segunda seção, que busca revisitar os conceitos da literatura especializada, a partir de uma leitura evolucionária, acerca do aprisionamento

tecnológico de forma geral. Finalmente, a terceira seção é dedicada a examinar como essa literatura especializada, de corte neo-Schumpeteriano, tem sido mobilizada no debate sobre o *lock-in* do carbono. Por fim, são apresentadas as principais conclusões.

### **1. Sistemas energéticos: características e implicações para transições energéticas**

Esta seção busca abordar conceitos e características atinentes a sistemas energéticos e transições energéticas, de modo a oferecer alguns elementos básicos, mas ainda assim fundamentais, para que se compreendam dificuldades – e possibilidades – para uma transição rumo a uma economia de baixo carbono.

O conceito mais elementar é o de sistemas energéticos, ou “sistemas energéticos antropogênicos”, como a eles se refere Smil (2010a). Embora já apresentado na introdução, não é demais retomar aqui esta noção e seus componentes.

Nas sociedades, os sistemas energéticos são concebidos e implementados com o objetivo de fornecer energia para o atendimento de demandas por serviços energéticos a usuários finais. Um sistema energético possui componentes relativos à produção de energia, sua conversão, transmissão, distribuição e uso final (IPCC, 2014). Smil (2010a) propõe que os sistemas energéticos são formados por três componentes fundamentais: as fontes naturais de energia, suas conversões e a variedade de formas específicas de uso dos fluxos energéticos disponíveis.

Inicia-se, pois, esta seção, com algumas considerações sobre os tipos de uso final da energia em nossas sociedades, passando a seguir pelas fontes de energia e sua classificação, para então apresentar o conceito de conversão (e *prime movers*), para finalmente tocar o tema das transições. Observe-se, rapidamente, a questão dos usos finais.

Parece uma obviedade dizer que a energia sempre foi de fundamental importância para o crescimento econômico e, de forma mais ampla, para o desenvolvimento das sociedades. E, hoje, fica cada vez mais claro que os sistemas energéticos são fundamentais para que o desenvolvimento, nas suas esferas econômicas, ambiental e de bem-estar social, se dê em bases sustentáveis. Os usos finais da energia em nossas sociedades incluem iluminação, transportes, aquecimento, resfriamento e refrigeração permitindo conforto e saúde (O’CONNOR, 2010).

Desnecessário dizer, ainda, que a energia em quantidades crescentes é necessária para permitir a reprodução de um sistema mundializado. Sem deixar de lado o reconhecimento de que muita energia é empregada para garantir o acesso – inclusive do ponto de vista geopolítico – às fontes de hidrocarbonetos, é possível apontar para algumas das formas mais modernas da vida social que, aparentemente “desmaterializadas”, demandam quantidades crescentes de energia – e também de recursos minerais, para que se concretizem. Redes de comunicação, que sustentam a troca de informações em tempo real, seu armazenamento “em nuvem” demandam bases físicas em *data centers* cuja construção, operação (inclusive refrigeração) e manutenção requerem quantidades de energia equivalentes a cidades de algumas centenas de habitantes. Redes de logística globais, contemplando múltiplos modais (rodoviário, ferroviário, aquaviário, aeroviário), com contêineres e armazéns muitas vezes refrigerados, têm demandas intensivas em combustíveis fósseis. Ano a ano, entre 80 e 90% da oferta global de energia primária com vistas ao atendimento de toda sorte de demanda final, tem sido suprida pelo recurso a fontes fósseis (SMIL, 2010b; 2010b).

Isso nos leva a um segundo ponto: o que seria energia primária? O segundo componente dos sistemas energéticos antropogênicos consiste das fontes de energia utilizadas nas atividades realizadas pelas sociedades. Essas fontes podem ser classificadas dicotomicamente como primárias e secundárias e também em renováveis e não renováveis (SMIL, 2010a).

Segundo Smil (2010a), as fontes primárias são estoques de energia química que são coletados (como madeira e seus resíduos) ou extraídos (como carvão, óleos crus e gases naturais). O processamento do material primário e sua mudança de estado físico servem para produzir combustíveis secundários, ou seja, na passagem da energia primária para a secundária, há o envolvimento de transformações físico-químicas.

Por sua vez, as energias renováveis incluem: a radiação solar e todas as transformações biosféricas (como as fitomassas formadas a partir da conversão fotossintética da radiação solar em energia química

dos tecidos vegetais); energia dos ventos, energia das águas; correntes oceânicas, energia geotérmica (calor da terra “gerado pela decomposição de isótopos produtores de calor na crosta do planeta e pelo calor que se eleva de seu núcleo”) (SMIL, 2010a, p. 3).

Entre as energias não renováveis, os combustíveis fósseis são as mais importantes e todos compartilham a presença dominante de carbono. A quantidade de energia que se produz a partir de massas equivalentes de energias renováveis pode ser conhecida pela comparação de uma métrica específica: a densidade energética. A densidade energética do carvão antracito (melhor qualidade), por exemplo, é de 30MJ/kg (megajoule por kilograma); a maioria dos carvões betuminosos (empregados para a produção de vapor) possui uma variação entre 20 e 25 MJ/kg. Os óleos brutos possuem uma densidade energética ainda maior e são muito mais uniformes com relação a essa medida (com variação entre 40 e 42 MJ/kg), assim como os gases naturais (entre 35 e 40 MJ/m<sup>3</sup>). Em contrapartida, a densidade energética presente na fitomassa (madeira seca), uma fonte energética renovável e que constituiu por muitos milhares – senão alguns milhões de anos – o mais importante combustível para aquecimento e cozimento doméstico, é de 15MJ/kg (SMIL, 2010a).

O carvão vegetal foi o único combustível secundário utilizado pelas sociedades pré-industriais. O processo de produção que dá origem a esse combustível é denominado de pirólise, que é a decomposição térmica da fitomassa lenhosa na ausência de oxigênio. Nesse processo, todos os componentes voláteis são expulsos, caracterizando um combustível à base de praticamente carbono puro, quase sem fumaça, cuja combustão, bem oxidada, produz apenas CO<sub>2</sub> e com alta densidade de energia, similar à do carvão mineral.

Os combustíveis secundários mais importantes atualmente são aqueles advindos da refinação de óleos crus, que possuem maior densidade energética (SMIL, 2010a). A introdução de combustíveis fósseis em substituição aos combustíveis tradicionais renováveis teve início durante a Revolução Industrial com a utilização do carvão mineral nas máquinas movidas a vapor. A transição foi concluída na década de 1920 quando o carvão chegou ao seu pico no fornecimento de energia no mercado global, que posteriormente foi substituído progressivamente por fontes de energia à base de petróleo e gás natural (GRUBLER, 2008).

O caso da eletricidade, de acordo com Smil (2010a, p. 6), assume os dois tipos de formatos, tanto primário quanto secundário:

A eletricidade primária envolve todas as conversões de fluxos de energia natural e renovável, incluindo os de água e vento, o calor da Terra e a radiação solar. A eletricidade primária também pode ser gerada pelo aproveitamento das ondas do oceano e as diferenças de temperatura entre a camada superficial do oceano mais quente e as águas constantemente frias abaixo. A eletricidade nuclear é ainda outra forma de energia primária, com vapor para grandes turbogeradores derivados da fissão controlada do urânio. A eletricidade secundária usa o calor liberado da queima de combustíveis fósseis, principalmente carvão para turbogeradores a vapor e gás natural para turbinas a gás (tradução livre).

A eletricidade, em nossa sociedade, é predominantemente de origem secundária e para sua geração é necessário que se disponha de dispositivos de conversão, o que nos leva ao terceiro ponto desta seção. E ao terceiro componente dos sistemas energéticos.

Aqui, cabe apresentar alguns outros conceitos, como conversão de energia e *prime movers*, destacando como a criação de infraestruturas e a emergência de uma variedade de serviços permitem compreender como os sistemas energéticos se tornam integrados e, de certa forma, oferecem resistências a mudanças.

Conforme observam os especialistas em estudos da energia (*Energy Studies*), os usos finais da energia – iluminação, geração de calor, climatização, geração de força motriz – demandam que a energia seja convertida de suas formas “brutas” (energia primária) para formas secundárias, e que, além disso, infraestruturas e serviços de apoio sejam construídos a fim de possibilitar o transporte da energia, sua distribuição e, enfim, a manutenção de todo o sistema energético (SMIL, 2010a; 2010b).

As sociedades capitalistas estão sempre à procura de novas fontes energéticas que garantam maior eficiência, maior segurança e que sejam capazes de promover o desenvolvimento das suas diversas atividades sociais e econômicas e que possam, ainda, garantir certo nível de conforto social. A evolução dos modernos sistemas de energia tem sido sustentada pela busca de uma alta eficiência de conversão: “a

eficiência aprimorada tem sido o principal objetivo dos projetistas de turbogeradores a vapor cada vez maiores, que agora produzem a maior parte da eletricidade do mundo”<sup>4</sup> (SMIL, 2010b, p. 109). É nesse sentido que o autor apresenta os dispositivos que são capazes de converter a energia em sua forma primária de maneira que as sociedades possam utilizá-las nas suas diversas atividades<sup>5</sup>. Esses são os denominados “*prime movers*”.

Os *prime movers* são máquinas (artefatos, dispositivos) capazes de transformar a energia disponível na natureza (energia de fonte primária) em energia mecânica (ou cinética). Ou seja, esses dispositivos são conversores de energia que levam a formas mais adequadas para o uso final dos seres humanos (SMIL, 2010a; 2010b).

De acordo com Smil (2010a, p. 6-7), os músculos humanos foram os primeiros *prime movers* capazes de converter a “energia química nos alimentos em energia cinética de caminhada, corrida e incontáveis tarefas manuais”. Em seguida, com a domesticação de animais, esses forneceram os *prime movers* mais poderosos, que foram utilizados pelas sociedades pré-industriais no trabalho de campo, transporte e para outras tarefas.

Os *prime movers* podem ser do tipo móvel (geralmente utilizados em transportes) ou estacionário. Historicamente, o motor a vapor tornou-se o primeiro *prime mover* mecânico impulsionado pela queima de combustíveis, durante o século XVIII. A utilização de turbinas a vapor em transportes marítimos é datada do início do século XX. Entretanto, o *prime mover* movido a diesel tornou-se dominante para esse tipo de transporte. Além disso, o diesel foi o combustível que alimentou o transporte rodoviário pesado e uma variedade de veículos *off-road*, enquanto que os motores de combustão interna alimentados à gasolina emergiram como os *prime movers* móveis mais numerosos do mundo. Por outro lado, os *prime movers* estacionários<sup>6</sup> são utilizados principalmente para produção de eletricidade. Os motores elétricos, enquanto que os movidos à combustão interna alimentam a maioria dos processos industriais (SMIL, 2010a).

Portanto, observa-se que as diversas formas de energias necessitam de um processo transformador que converta a energia em formas adequadas para o uso final. Ou seja, a fonte de energia necessita passar por um processo de conversão, notadamente os *prime movers*.

Há, ainda, a necessidade de criar mecanismos de transporte da energia. Há, então, uma infraestrutura especializada capaz de suportar todo o sistema energético, permitindo que a energia possa chegar a seus usos finais, os quais viabilizam as mais diversas atividades sociais e os mais variados setores econômicos (famílias, indústrias, comércio, transporte, etc.)<sup>7</sup>.

Por fim, existem os serviços de apoio criados dentro desse sistema, que atendem a variadas funções. Há serviços de automecânica e seguro automotivo, por exemplo, que permitem que os veículos da frota movidos a combustíveis fósseis se mantenham em operação. Há serviços de manutenção de eletrodomésticos, que são conversores da energia elétrica em serviços domésticos ao usuário final; serviços de manutenção das estradas de rodagem; e serviços públicos de operação, de manutenção e regulação atuantes no sistema. Enfim, são serviços diversos que permitem que o sistema continue em operação e se amplie.

As funções do sistema – sua concepção, sua operação, sua manutenção, seu monitoramento, sua ampliação, sua avaliação – demandam e implicam a existência de agentes socioeconômicos, tanto no

---

<sup>4</sup> Turbogenerador consiste de um conjunto formado por uma turbina a vapor, hidráulica ou a gás, que aciona um gerador elétrico (cf. Aulete online).

<sup>5</sup> Segundo Smil (2010a, p. 7) “os principais critérios usados para classificar os usos de energia, bem como a implantação de *prime movers*, são a localização do processo de conversão, a temperatura do uso final e os principais setores econômicos”.

<sup>6</sup> A combustão estacionária fornece energia (eletricidade, calor, vapor), por meio da queima de combustíveis, para movimentar motores e equipamentos estacionários (como turbogeradores a vapor e turbinas hidráulicas) (SMIL, 2010a; IPCC, 2006).

<sup>7</sup> Smil (2010a, p. 12) nota que “as necessidades infraestruturais alcançaram um nível inteiramente novo com a exploração de hidrocarbonetos, cuja extração em grande escala requer infraestruturas complexas e caras. Os gasodutos são necessários para transportar petróleo bruto e gás natural para os mercados (ou para a costa, para viabilização de exportações) e um pré-tratamento (separação de água, salmoura, gases de petróleo ou sulfeto de hidrogênio) pode ser necessário antes do envio desses combustíveis por um oleoduto” (tradução livre).

domínio público quanto no privado, que se tornam, em alguma medida, partes do próprio sistema. Funcionalmente integrados aos sistemas, esses agentes tornam-se, pois, interdependentes.

Dessa forma, pode-se dizer que todo o sistema gera interdependências que contribuem para que ele seja, por um lado, confiável, integrado e resiliente. Por outro lado, essas interdependências, ao conferir certa coesão ao sistema, acabam também o tornando menos flexível no sentido da propensão a mudanças radicais. São interdependências de difícil ruptura. As virtudes de um sistema energético, em termos de sua confiabilidade, integração e resiliência, acabam contribuindo para que ele resista ao intercambiamento de uma fonte energética para outra, mesmo que esta última venha a ser mais eficiente, seja renovável ou que apresente outras características, que possam torná-la desejável.

A mudança entre sistemas energéticos tem ocorrido, de acordo com Smil (2010a), de forma mais evolutiva do que revolucionária ao longo dos últimos dois séculos. Compreender essa evolução implica falar em transições, conceito ao qual é dedicado o quarto ponto desta seção.

Na busca por uma maior eficiência energética, as sociedades têm transitado de um sistema energético para outro. O conceito de transição energética não é consensual na literatura (ARAÚJO, 2014). O'Connor (2010, p. 2) definiu a transição energética como “um conjunto particularmente significativo de mudanças nos padrões de uso de energia em uma sociedade, potencialmente afetando recursos, transportadores, conversores e serviços”. Ou seja, uma transição de energia refere-se ao período decorrente entre a introdução de uma nova fonte de energia primária, ou de um *prime mover*, e sua completa disseminação por todo o mercado (SOVACOOOL, 2016). Ainda, há uma mudança na natureza ou padrão de como a energia é utilizada dentro de um sistema, seja local ou global (ARAÚJO, 2014).

A tecnologia dentro do sistema energético deve ser pensada como parte de sistemas tecnológicos maiores que fornecem serviços de energia para consumidores, principalmente tecnologias de combustíveis fósseis, e não pensada em artefatos como ocorre comumente. Nesse sentido, a tecnologia deve ser compreendida em termos de *know-how* embutido em sistemas e subsistemas ligados à complexa arquitetura. Assim, o sistema tecnológico que movimenta o sistema energético considera componentes inter-relacionados conectados em uma rede ou infraestrutura que inclui elementos físicos, sociais e informacionais (UNRUH, 2000). Segundo o autor, o sistema tecnológico do sistema de transportes possui um caráter multinível de análise, sendo composto por uma variedade de subsistemas interconectados, incluindo carros, rodovias, sinalização, estações de serviços, dentre outros, cuja administração cabe a instituições de caráter público ou privado. O mesmo autor ainda propõe que o próprio automóvel pode ser visto como um “sistema tecnológico composto”, formado por subsistemas, como motor, trem de força, sistemas de freio, dentre outros (UNRUH, 2000, p. 819).

Assim, pode-se dizer que a transição energética de automóveis ocorre em nível setorial (subsistema de transporte) e nacional. O caso brasileiro é um exemplo de transição energética dentro desse modelo. O programa Proálcool é visto como uma das experiências em transições mais rápidas de que se têm registro. Em seis anos, entre 1975 e 1981, 90% da frota de carros de passeio no Brasil podia ser movida a etanol (SOVACOOOL, 2016). Como se percebe, transições não implicam necessariamente irreversibilidade.

O fenômeno das transições energéticas pode acontecer em escalas diferentes: global, nacional, local, existindo mesmo transições setoriais. Observa-se ainda que transições podem ocorrer tanto de maneira lenta e gradual, quanto de forma acelerada. Isso irá depender do contexto e da escala da matriz em que a transição ocorre. Outros fatores explicativos incluem as formas de energia envolvidas, as tecnologias de uso e sua difusão e o período histórico (GRUBLER, 2008; SOVACOOOL, 2016; SMIL, 2010a; SMIL, 2016).

Uma vez que são concernentes a sistemas energéticos, as transições energéticas compreendem tanto transformações pelo lado da oferta quanto pelo lado dos usos finais da energia. Pelo lado da demanda, Smil (2010a) observa que o surgimento de novos mercados de energia, inovações técnicas em usos finais, e serviços de energia mais eficiente são elementos geradores de *feedbacks* reforçadores entre as partes do sistema, determinando suas mudanças evolutivas.

No que consiste das transições energéticas em diferentes tipos de escala, Smil (2010a) afirma que atualmente o sistema energético está cada vez mais se tornando global, dependente principalmente de fontes hidrocarbonetas. Em sua escala global, esse sistema conta com quase 50 países exportadores e

quase 150 nações importadoras de petróleo bruto. São quase os mesmos números envolvidos nas transações internacionais de produtos petrolíferos refinados. No caso das transações de gás natural, são mais de 20 Estados ofertantes, que disponibilizam o produto seja por meio de oleodutos transfronteiriços ou por meio de petroleiros que transportam gás liquefeito. O sistema envolve, ainda, quase uma dúzia de importantes exportadores de carvão e um número semelhante de grandes importadores de carvão (SMIL, 2010a, p. 13).

Em nível nacional, países com territórios pequenos, compactos e com alta densidade populacional são capazes de passar por uma transição rápida de energia. É indiferente se são economias ricas ou sociedades essencialmente pré-modernas com baixo produto econômico *per capita*. Uma vez que esses países descobrem uma nova fonte de energia primária, podem desenvolvê-la com rapidez e findam com fundações de energia completamente transformadas em menos de uma geração. Exemplos desse tipo de transição rápida são representados pelo caso da Holanda, ao descobrir um gigante campo de gás natural de Groningen, no município de Slochteren, na parte norte do país, e o caso do Kuwait, com a descoberta de seus campos de petróleo.

Em contraste, economias grandes, principalmente aquelas com alto nível de produto *per capita* e que possuem uma infraestrutura extensiva para servir a um tipo de combustível estabelecido não podem realizar as substituições tão rapidamente. O caso da Grã-Bretanha ilustra esse ponto. Em 1965, a BP fez as primeiras descobertas de gás natural no setor britânico do Mar do Norte. Embora tenha havido uma exploração importante dos depósitos mais ricos e relativamente próximos à costa, não foi possível à Grã-Bretanha realizar em 30 anos o que a Holanda fez em uma década (SMIL, 2010a, p. 19).

Deve, pois, ficar claro que a forte interdependência dos componentes nos sistemas energéticos, impulsionada desde logo pelos altos investimentos em infraestrutura e em numerosas atividades de serviços conexos, dificulta a rápida transição para um sistema mais eficiente. Ou seja, quanto maior a disseminação de um tipo de energia em um mercado de grandes dimensões, mais difícil, e lenta, se torna uma eventual transição. Assim, um país com um grande mercado de hidrocarbonetos pode ficar *aprimado* por longos períodos nessas fontes de energia.

Cumprindo ainda ressaltar que há evidências de que toda transição para uma nova forma energética foi intensiva no uso das formas energéticas pretéritas. Ou seja, para transitar de um sistema energético para outro, foi necessária a utilização intensa do *prime mover* da maneira antiga. Dessa forma, a transição para a uma economia de baixo carbono é altamente carbono intensiva.

Na próxima seção, busca-se trazer brevemente elementos teóricos da literatura Neo-Schumpeteriana sobre a mudança técnica, trajetórias e paradigmas, a fim de dar suporte teórico para a discussão subsequente.

## **2. Paradigmas no arcabouço neo-Schumpeteriano: mudanças evolucionárias e revolucionárias**

Dosi (1982) apresenta a definição do conceito de tecnologia em seu artigo seminal *Technological paradigms and technological trajectories* em um sentido mais amplo até então aceito pela teoria econômica, afirmando que a tecnologia é um conjunto de conhecimentos que está relacionado tanto a problemas práticos quanto teóricos. Esse último envolve ainda *know-how*, métodos, procedimentos, experiências de sucesso e de fracasso, além de infraestrutura física referente a equipamentos.

Nesse sentido, pode-se dizer que o processo inovador implica uma atividade de pesquisa intrinsecamente incerta e com resoluções de problemas com base em combinações variadas de conhecimento público e privado, geralmente princípios científicos e experiências idiossincráticas, procedimentos bem articulados e competências tácitas. Por sua vez, o conceito de *paradigma tecnológico* é apresentado

em larga analogia com a definição Kuhniana de um “paradigma científico”, deve-se definir um “paradigma tecnológico” como “modelo” e um “padrão” de solução de problemas tecnológicos selecionados, com base em princípios selecionados derivados das ciências naturais e em selecionados materiais tecnológicos (tradução própria) (DOSI, 1982, p. 152).

Desse modo, Dosi (1982; 1988) associa a existência de paradigma tecnológico à filosofia da ciência moderna que sugere a existência de *paradigmas científicos*. O autor utiliza como fonte inspiradora o conceito de paradigma científico desenvolvido por Thomas Kuhn (1962). A solução dos problemas



tecnológicos estaria associada a uma atividade “normal” análoga à ideia kuhniana de “ciência normal”. La Rovere (2006, p. 288) elucida esse ponto ao apresentar de forma clara a ideia de Kuhn que um

paradigma científico representa na realidade uma estrutura institucionalizada de conhecimentos que coloca os problemas a serem resolvidos e o método para enfrentá-los. A mudança de paradigma – ou seja, o surgimento de um problema científico que não pode ser resolvido pelos instrumentos existentes – resultaria em uma revolução científica.

Define-se ainda que um paradigma tecnológico nada mais é que um padrão para a solução de problemas técnico-econômicos selecionados. Os paradigmas são capazes de definir as oportunidades tecnológicas para promover a inovação e alguns procedimentos básicos de como explorá-las (DOSI, 1988). Assim sendo, o paradigma está associado à produção de conhecimentos tecnológicos e oferece um conjunto de prescrições, além de definir as direções das mudanças técnicas a serem seguidas (LA ROVERE, 2006).

O paradigma está atrelado à capacidade de acumulação e mudança das firmas. Mudança tecnológica é um processo cumulativo, uma vez que aquilo que as firmas esperam fazer no futuro está fortemente condicionado pelo que ela foi capaz de fazer no passado. Ou seja, representa a trajetória e a direção da mudança em uma dada escolha tecnológica (DOSI, 1982; 1988).

Corazza e Fracalanza (2004) destacam a existência de uma importante dimensão cognitiva, compartilhada pelos agentes econômicos e pela comunidade científica, aderente ao paradigma tecnológico que leva a interpretação do problema e dos princípios empregados para solucioná-los. Nesse sentido, o caráter cognitivo limita o processo de busca por novo conhecimento e possui um efeito exclusão, como afirma Dosi (1982):

Os paradigmas tecnológicos têm um poderoso “efeito de exclusão”: os esforços e a imaginação tecnológica dos engenheiros e das instituições em que eles se inserem estão focalizados em direções bastante precisas, estando eles – por assim dizer – “cegos” com respeito a [outras] alternativas tecnológicas (DOSI, 1982, p. 153).

Como destacado, o termo paradigma técnico de Dosi representa o acordo tácito entre os agentes envolvidos no processo de inovação sobre o quais se convencionam uma direção de busca válida, que seria considerada uma melhoria ou uma versão superior de um produto, serviço ou tecnologia (PEREZ, 2009). Dosi (1988) reafirma que o processo de solução inovativa envolve descoberta e criação, além da experiência prévia e conhecimento formal acumulado. Dessa forma, destaca-se a importância do conhecimento tácito dos atores envolvidos na inovação.

Perez (2009) afirma que o processo de mudança é *path dependent* visto que o potencial do mercado depende muitas vezes do que o mercado já aceitou, ou seja, depende do sucesso adquirido, além disso, a incorporação da mudança técnica nos bens requer a união de várias bases de conhecimento explícitas e tácitas preexistentes e variadas fontes de experiência prática. A solução alternativa, ainda que melhor, pode se tornar *locked out* por “eventos históricos” que explicam, por exemplo, o monopólio de uma tecnologia inferior (ARTHUR, 1989).

De acordo com Brian Arthur (1994), até mesmo economias desenvolvidas como Estados Unidos e Japão podem ficar *aprisionadas* em caminhos inferiores de desenvolvimento (padrões tecnológicos inferiores), dada suas escolhas tecnológicas. Nas palavras do autor, “uma vez que eventos econômicos aleatórios selecionam um caminho particular, a escolha pode ficar *locked in*” (ARTHUR, 1994, p. 82). Ainda afirma que “convenções ou padrões tecnológicos, assim como tecnologias específicas, tendem a ficar *locked in* por um *feedback* positivo” (ARTHUR, 1994, p. 93).

Arthur (1989; 1994) apresenta um modelo de competição entre tecnologias com múltiplos resultados potenciais, ou seja, há um processo de escolhas entre tecnologias concorrentes, a qual será adotada não necessariamente é a melhor, torna-se eficiente, pois foi escolhida. As tecnologias preteridas ficam *locked out* e são expulsas pelo mercado e desaparecem, ao passo que as tecnologias vencedoras se dão por mecanismos de retornos crescentes dinâmicos de escala, em que a tecnologia adotada está associada a um tipo de aprendizado pelo lado da demanda, como *learning by using*. Nesse caso, eventos casuais podem proporcionar vantagens à tecnologia, principalmente por meio da atração dos consumidores pela tecnologia e *feedbacks* positivos deles.

No arcabouço neo-Schumpeteriano, além do construto correspondente a paradigma e às explanações do *lock-in* tecnológico, também é possível divisar o tratamento de um *aprisionamento* técnico-econômico-institucional. Nesta senda, o conceito de paradigma técnico-econômico de Carlota Perez (1983) visa ampliar o escopo do conceito de paradigma tecnológico proposto por Giovanni Dosi. Para além da dimensão evolucionária, presente no conceito de Dosi, o conceito de Perez abarca a transformação *revolucionária*. Nesse sentido, o termo foi concebido para entender o processo de crescimento de longo prazo e as assincronias entre as esferas técnico-econômica e sócio-institucional.

A ideia de paradigmas técnico-econômicos busca identificar a noção de revoluções tecnológicas de acordo com o esforço da corrente neo-Schumpeteriana no sentido de compreender a inovação e identificar as regularidades, continuidades e descontinuidades no processo de inovação (PEREZ, 2009). Dessa maneira, os autores dentro dessa linha de argumentação partem da premissa de que a mudança tecnológica é o motor do desenvolvimento capitalista, como interpretado por Schumpeter, para então analisar a forma como as inovações são geradas e difundidas no capitalismo. Nesses termos, “o processo de geração e difusão das inovações seria o principal fator determinante dos chamados ciclos longos do capitalismo” (LA ROVERE, 2006, p. 285). Segundo Freeman (1984) “Schumpeter sustentava que essas características da inovação implicariam que os distúrbios engendrados poderiam ser suficientes para romper o sistema existente e provocar um padrão cíclico de crescimento”. Assim, a dinâmica econômica estaria baseada em inovações.

De modo geral, a cada revolução tecnológica surgem novos paradigmas técnico-econômicos. “Uma revolução tecnológica pode ser definida como um conjunto de descobertas radicais inter-relacionadas” (PEREZ, 2009, p. 189), que por sua vez, formam uma extensa coleção de tecnologias interdependentes. As transformações de ordem técnica impactam de maneira decisiva na economia dos países, fazendo surgir novos paradigmas.

Perez (2009) destaca a existência de cinco revoluções tecnológicas: a primeira é a revolução industrial britânica do século XVIII; a segunda é marcada pela era do vapor e das estradas de ferro; a terceira é caracterizada pela era do aço, eletricidade e engenharia pesada do século XIX. Por sua vez, a quarta revolução é caracterizada pelo paradigma fordista, vigente no século XX (era do petróleo, do automóvel e da produção em massa) e por fim, a revolução da microeletrônica, iniciada na década de 1970, caracteriza a quinta revolução tecnológica (a era da informação e das telecomunicações). Como destaca Perez (2009),

a atual revolução da tecnologia da informação, por exemplo, abriu um sistema de tecnologia inicial em torno dos microprocessadores (e outros semicondutores integrados), seus fornecedores especializados e seus primeiros usos em calculadoras, jogos e em miniaturização e digitalização de instrumentos de controle e outros instrumentos para fins civis e militares. Este sistema foi seguido por uma série sobreposta de outras inovações radicais, minicomputadores e computadores pessoais, software, telecomunicações e a internet, cada um dos quais abriu novas trajetórias de sistema, ao mesmo tempo em que estava fortemente inter-relacionado e interdependente (tradução própria) (PEREZ, 2009, p.189).

Nesse sentido, entende-se que a cada revolução tecnológica abre-se um leque de oportunidades combinando inovações de produtos, de processos, técnicas organizacionais e administrativas que leva a associação de um paradigma técnico-econômico definido. Assim sendo, o paradigma é o resultado de um processo de seleção de inovações técnicas, organizacionais e institucionais, que provocam mudanças na economia (FREEMAN e PEREZ, 1988, LA REVERE, 2006; PEREZ, 2009).

La Rovere (2006) utiliza como base o artigo de Freeman e Perez (1988) o qual são sintetizadas as informações trazidas pelo Quadro 1, abaixo. A autora recupera os principais elementos constituintes de um paradigma técnico-econômico, cuja característica apresenta um conjunto específico de insumos, que são os fatores-chave da economia. Esses fatores são importantes na constituição do capitalismo, uma vez que o barateamento ou a descoberta desses insumos levam a novas formas de organização de produção e tomada de decisão pelos gestores. Ainda, a cada paradigma, o qual tem seu período específico de vigor, possui um conjunto de indústrias-chave.

Cumprе ressaltar que o início dos anos 1970 foi marcado pelo advento de um novo paradigma técnico-econômico que transformou a indústria e a sociedade global nos decênios subsequentes. Esse

paradigma, caracterizado pela revolução tecnológica da informação, tem seu epicentro os EUA e se espalhou pela Europa e Ásia (PEREZ, 2009).

**Quadro 1 – Os paradigmas técnico-econômicos**

Períodos	Descrição	Indústrias-chave	Fatores-chave	Organização Industrial
1770-1840	Mecanização	Têxtil, química, metalmecânica, cerâmica	Algodão e ferro	Pequenas empresas locais
1840-1890	Máquina a vapor e ferrovias	Motores a vapor máquinas-ferramenta, máquinas para ferrovias	Carvão, sistema de transporte	Empresas pequenas e grandes; crescimento das sociedades anônimas
1890-1940	Engenharia pesada e elétrica	Estaleiros, produtos químicos, armas, máquinas elétricas	Aço	Monopólios e oligopólios
1940-1980	Fordista	Automobilística, armas, aeronáutica, bens de consumo duráveis, petroquímica	Derivados do petróleo	Competição oligopolistas e crescimento das multinacionais
1980-período atual	Tecnologias da informação e comunicação	Computadores, produtos eletrônicos, software, telecomunicações, novos materiais, serviços de informação	Microprocessadores	Rede de firmas

Fonte: Freeman e Perez (1988, p. 55-57 *apud* LA ROVERE, 2006, p. 292).

Como consequência, a indústria foi reconfigurada pela produção de componentes microeletrônicos baratos (PEREZ, 2009) e a sociedade passou a ter acesso a produtos com maior conteúdo tecnológico e com menor custo unitário. Além disso, tal reconfiguração permitiu ampliar a difusão da informação através das fronteiras nacionais com maior agilidade e menor custo de processamento.

Perez (2009) ainda menciona que há transformações culturais e até mesmo institucionais que estão envolvidas nessas mudanças de paradigmas técnico-econômicos. Nesse sentido, existe uma complexidade nessas transformações, cuja mudança cultural influencia e é influenciada pelas mudanças técnico-econômicas<sup>8</sup>.

Para os efeitos atinentes dos estudos das transições é conclusivo que o fenômeno associado às transições se apresenta de maneira evolucionária ao invés de possuir características revolucionárias. Dessa maneira, a mudança tecnológica segue paradigmas muito mais num sentido de “evolução” do que de “revolução”. Ou seja, de transformações mais gradativas, lentas e dependentes da trajetória do que mudanças rápidas, profundas e disruptivas.

Cumprе ressaltar que Corazza e Fracalanza (2004) chamaram a atenção para o caráter evolucionário das mudanças num quadro de leitura neo-schumpeteriano. No mesmo sentido, Maria (2017) afirma que essa literatura de cunho evolucionário auxilia na compreensão das dificuldades em se transitar para uma economia de baixo carbono, uma vez que as economias ficam aprisionadas em trajetórias inferiores que geram impactos tanto sociais quanto ambientais. Por outro lado, advoga-se que haverá, ainda, que se considerar, para efeito dos avanços do argumento esboçado neste estudo, a necessidade de se aprofundar numa discussão sobre mudanças “revolucionárias”.

Nesses termos, a próxima seção busca mostrar a importância da transição de sistemas energéticos tradicionais mais poluentes para aqueles sistemas que perpassam por um processo de descarbonização num quadro teórico evolucionário. Como já foi visto, a interdependência sistêmica causa um bloqueio

<sup>8</sup> Perez (2009) nota que “os novos sistemas de tecnologia não só modificam o espaço de negócios, mas também o contexto institucional e até mesmo a cultura em que ocorrem [...]. É provável que sejam necessárias novas regras e regulamentos, bem como treinamento especializado, normas e outros facilitadores institucionais (às vezes substituindo os estabelecidos). Estes, por sua vez, tendem a ter efeitos de *feedback* muito fortes sobre as tecnologias, moldando e orientando a direção que eles tomam dentro do alcance do possível” (tradução própria) (PEREZ, 2009, p. 188).

(aprisionamento) no processo de transição, que muitas vezes há uma utilização intensa do *prime mover* movido à energia do paradigma anterior (principalmente o paradigma dominante carbono-intensivo).

### 3. Insights sobre transição energética e o aprofundamento do lock-in: evidências a partir de um estudo de patentes de Oil Carbon Majors selecionadas

A leitura de textos fundamentais da literatura sobre transições energéticas permite identificar elementos para uma definição ampla sobre o conceito e sobre o *lock-in* no carbono. Nesta seção, procura-se, de um lado, fornecer alguns *insights* de modo a caracterizar elementos fundamentais dos conceitos de transições. De outro, objetiva-se apresentar os resultados de um estudo sobre patentes depositadas por *Oil Carbon Majors* selecionadas, como evidências de um aprofundamento atual, em nossas sociedades, no paradigma fóssil intensivo.

Grubler (2012) destaca três *insights*: 1) a importância do uso final de energia na condução de transições energéticas; 2) as taxas da mudança são lentas, mas nem sempre e 3) existência de padrões distintos na ampliação bem sucedida de sistemas tecnológicos. O primeiro *insight* está associado às transformações institucionais, organizacionais e tecnológicas que são os motores para as transições dos sistemas energéticos. Ainda, apresenta, pelo lado da demanda de energia, mudanças nos padrões de consumos dos usuários de serviços de energia, que induzem as transformações no fornecimento desta.

O segundo ponto ressalta a velocidade em que as transições ocorrem. Essa velocidade, por vezes, está condicionada a um *aprisionamento* do sistema energético, de modo que apresenta uma lenta transição, revelando a característica de dependência da trajetória do sistema energético. Por outro lado, a história dos sistemas energéticos mostra casos que em poucos anos observou-se uma rápida transição nas suas diferentes escalas.

Por fim, o último *insight* mostra que o sucesso de uma transição energética se dá por meio do aumento de soluções tecnológicas. Grubler (2012) destaca que uma das soluções tecnológicas, e que deve ser implementada em larga escala para o enfrentamento das mudanças climáticas, é aquela que estão relacionadas à captura e sequestro do carbono. De fato, essas soluções tecnológicas são conquistadas por empresas, cujas atividades tecnológicas estão associadas a paradigmas tecnológicos definidos.

Desde logo, é imperativo e consensual observar a presença do elemento de *aprisionamento* (*lock-in*) tecnológico, salientado pelos autores que se debruçam sobre o tema das transições energéticas (UNRUH, 2000; 2002; UNRUH e CARRILLO-HERMOSILLA, 2006; SMIL, 2010a; 2010b; 2016; WILSON e GRUBLER, 2011; GRUBLER, 2012; ARAÚJO, 2014; SOVACOOOL, 2016).

As dificuldades em romper esse aprisionamento, num desejável trânsito para uma economia de baixa intensidade de carbono, têm a ver com o fato de que “a maioria das transições de energia tem sido, e provavelmente continuará a ser *path dependent* em vez de revolucionária, cumulativa em vez de totalmente substitutiva” (SOVACOOOL, 2016, p. 2). O elemento de *path dependence* auxilia a explicar as diferenças nos padrões de uso energético e escolhas de padrões técnicos entre países e regiões, mesmo em níveis comparáveis de renda (WILSON e GRUBLER, 2011).

*Lock-in* e *path dependence* são elementos aportados pela literatura evolucionária sobre mudança tecnológica. Desse modo, um exercício voltado à compreensão do debate sobre (e as possibilidades para) transições energéticas, com a consideração de transformações que vão além daquelas de natureza estritamente tecnológica, para uma economia de baixo carbono numa leitura evolucionária, deve incluir o exame dos elementos de *lock-in* e *path dependence* dos sistemas energéticos intensivos em carbono. Esse exame, necessariamente, deve revelar aspectos que dizem respeito à incorporação (*embeddedness*) dos sistemas energéticos na dimensão mercantil (atinente às estruturas e estratégias de oferta e configurações da demanda energética) e na dimensão institucional (referente às políticas públicas e às institucionalidades locais, nacionais e internacionais que moldam mercados no setor de energia, estabelecendo normas e regras de variadas naturezas para operação e regulação dos variados agentes nesses mercados). Exercícios analíticos nessas dimensões devem permitir compreender as

interdependências entre as configurações dos sistemas energéticos, as políticas públicas e as estratégias tecnológicas, sobretudo de grandes corporações do setor de petróleo e gás<sup>9</sup>.

O *lock-in* do carbono é por vezes abordado e compreendido como uma dependência tecnológica compulsória das civilizações que fizeram um tipo de escolha tecnológica (ou padrão tecnológico) no passado e estão subjugadas pelos altos investimentos em infraestruturas (transportadores) ou *prime movers* (que possuem *know-how* embutido) no presente e que são difíceis de serem dissolvidos. Portanto, entende-se que o capital não abandona os investimentos feitos, principalmente aqueles destinados à infraestrutura do sistema energético. Observa-se que há um alto grau de comprometimento dos atores envolvidos com os elementos do sistema, caracterizando-se, assim, um *aprisionamento* do sistema energético.

O conjunto de escolhas tecnológicas feitas pela sociedade pode restringir modelos futuros vinculados às transições energéticas, muitas das vezes estão baseados em limites auto reforçadores, com custos de investimentos irre recuperáveis (*sunk costs*). Mesmo que uma tecnologia seja superior à outra e seja viável economicamente ela não será adotada pelo mercado (ARAÚJO, 2014). Em outras palavras, um regime tecnológico dominante com seus componentes e altos custos de investimento, dificilmente será abandonado por outro tipo (WILSON e GRUBLER, 2011). Essa é a ideia do conceito de *lock-in* tecnológico descrito pelo modelo concorrencial entre tecnologias de Arthur (1989; 1994).

No caso das tecnologias destinadas à mitigação das transformações climáticas e que foram listadas em um inventário pela *Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas* (UNFCCC), então denominadas de energias renováveis ou energias verdes (classificadas na seção anterior), elucidam as possibilidades de natureza técnica para transitar de fontes poluentes baseadas no “paradigma dos hidrocarbonetos” para um “paradigma verde” e menos poluente. Ou seja, países e corporações devem se comprometer em diminuir as emissões dos GEE a partir de esforços tecnológicos competentes a mitigação climática.

Nesse sentido, Unruh (2000; 2002) apresenta a experiência de países industrializados e que ficaram aprisionados em sistemas tecnológicos de energia e de transporte (entende-se aqui o setor como um subsistema) baseados em combustíveis fósseis<sup>10</sup>. Para o autor, “esses sistemas tecnológicos se estabelecem por meio de um processo co-evolutivo entre infraestruturas tecnológicas, organizações, sociedade e instituições governamentais, ‘culminando’ no que foi denominado complexo técnico-institucional (CIT)” (UNRUH, 2002, p 317). O CIT cria uma barreira técnica-institucional e auto reforçadora que inibe ações políticas mesmo diante dos riscos climáticos globais e de alternativas tecnológicas de mitigação em países adotantes de um complexo técnico-institucional baseado no paradigma carbono-intensivo.

As fontes do *aprisionamento* de base técnica, em países industrializados, são exemplificadas por Unruh (2002, p. 318) por meio de um projeto dominante, arquitetura e componentes tecnológicos padrões e suas compatibilidades sociais. Já a ordem institucional é caracterizada pelo autor como a existência de uma intervenção política governamental, quadro legal e decisões departamentais e ministeriais.

De um lado, as transformações do complexo técnico-institucional dos países possibilitam a redução de custos econômicos e sociais de um projeto dominante em relação a fontes de energia alternativas, contribuindo para criar estabilidade, previsibilidade e confiabilidade dos agentes no sistema energético adotado. Por outro lado, o estabelecimento desse complexo gera um *aprisionamento* nesse sistema, que ao longo do tempo pode se mostrar problemático<sup>11</sup> (UNRUH, 2002).

---

<sup>9</sup> Justifica-se a escolha desse setor uma vez que são as corporações que mais contribuíram para as emissões históricas de GEE (HEEDE, 2014) e de fato, as estratégias dessas empresas, sejam tecnológicas ou agressivos *lobbies* políticos, influenciam nas negociações internacionais sobre as mudanças climáticas.

<sup>10</sup> Wilson e Grubler (2011, p. 166) lembram que “as experiências de crescimento de um país não podem necessariamente ser usadas para inferir as de outro. Existe uma diferença persistente entre as trajetórias de desenvolvimento que abrangem os extremos de alta intensidade energética (por exemplo, os Estados Unidos) para altamente eficiente em termos energéticos (por exemplo, Japão)”.

<sup>11</sup> Nesse ponto específico, Unruh (2002, p. 318) disserta: “como as decisões de política pública e investimento privado são frequentemente tomadas com previsibilidade limitada e descontando os potenciais riscos futuros ou desutilidades, as

O autor chama atenção para as evidências e previsões de ruptura do clima, quando confirmadas, uma transição deverá ocorrer novamente nos sistemas de energia baseados em combustíveis fósseis para uma economia de baixo carbono. Ou seja, uma transformação tecnológica e institucional deve ser condicionante para se criar as bases para essa transição paradigmática. Além disso, uma mudança nas organizações e nas sociedades é necessária de modo a permitir a difusão de novas soluções tecnológicas. Dessa forma, as organizações são o verdadeiro *locus* da inovação, que ao acumularem conhecimento e aprendizado, constituem-se de capacitações tecnológicas que possibilitam a mudança do sistema.

Ademais, dentre as tecnologias para mitigação das mudanças climáticas, há um crescente esforço de pesquisa das grandes corporações, principalmente do setor de petróleo e gás, sobre estratégias de captura e sequestro de carbono (CCS – sigla em inglês para *Carbon Capture and Sequestration* – ou *Storage*). Um exemplo que ilustra esse ponto é o caso da gigante do petróleo *British Petroleum* – BP, que está envolvida há pelo menos 18 anos em esforços para o acúmulo de capacitações tecnológicas no campo de CCS. Unruh e Carrillo-Hermosilla (2006) afirmam que a empresa já financiava uma iniciativa de um *Projeto de Captura do CO<sub>2</sub>* que reunia empresas de energia para o desenvolvimento conjunto de tecnologias de CCS<sup>12</sup>. O autor ainda afirma que atores governamentais (na época o governo Bush nos Estados Unidos)<sup>13</sup> e também atores não governamentais como a *Zero Emission Coal Alliance* – que reunia nove empresas de energia e associações industriais para comercializar tecnologias de CCS – estavam interessados nessa empreitada (UNRUH e CARRILLO-HERMOSILLA, 2006).

Destarte, Unruh e Carrillo-Hermosilla (2006) definem essas tecnologias como um conjunto de técnicas que capturam, armazenam e gerenciam o CO<sub>2</sub> liberado pelo uso de combustíveis fósseis. Entretanto, a empresa BP, juntamente com a Iniciativa Climática de Petróleo e Gás (*Oil and Gas Climate Initiative* – OGCI), utilizam o termo *Carbon capture, use and storage* (CCUS) para designar suas pesquisas e processos operacionais de produção<sup>14</sup>.

Unruh e Carrillo-Hermosilla (2006) afirmam que o conceito de *carbon capture* está associado a uma abordagem de continuidade. Ou seja, a continuidade significa, por definição, operar ou fazer mudanças dentro dos limites da estrutura técnico-institucional existente, que é baseada na estrutura e no caminho de desenvolvimento já estabelecido. Dessa maneira, evidenciam que o processo leva a uma inércia da mudança, em outros termos, dependente da trajetória. Além disso, para os autores, essa abordagem se alinha fortemente com os interesses das grandes corporações e instituições governamentais engajadas em objetivos de mitigação das mudanças climáticas.

Nas palavras dos autores, a captura e sequestro do carbono “parece ser de interesse para as empresas de energia de combustíveis fósseis porque pode preservar grande parte de seus investimentos existentes em tecnologia, *know-how* e capital durável” (UNRUH e CARRILLO-HERMOSILLA, 2006, p. 1191). Em outras palavras, os autores exortam sobre as dificuldades de ruptura do *lock-in* tecnológico do carbono por causa dos interesses das empresas incumbentes na permanência, tão longa quanto possível, no sistema energético associado ao paradigma carbono-intensivo. Essas empresas fizeram altos investimentos irrecuperáveis e, portanto, se mostram exigentes à maximização dos retornos dos ativos investidos. Além disso, essas empresas construíram e acumularam capacidades, conhecimentos e aprendizado técnico que dificultam a transição para outros ramos mercadológicos. A empresa irá investir naquilo que ela sabe fazer (*core business*). Entretanto, investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) são um meio pelo qual a empresa busca fazer algo novo, além de ampliar a capacidade de

---

consequências não intencionais podem ficar bloqueadas junto com as CITs. Este parece ser o caso da perturbação climática decorrente de sistemas de energia baseados em combustíveis fósseis”.

<sup>12</sup> O projeto foi formado no ano de 2000 e conta atualmente com a participação de quatro empresas (CCP4) que trabalham no avanço do *CO<sub>2</sub> capture and storage*: BP, Chevron, Petrobrás e Suncor (Informações retiradas do sítio institucional do projeto: <https://www.co2captureproject.org/>).

<sup>13</sup> “O Departamento de Energia dos EUA e o Departamento de Estado dos EUA lideraram a criação do Fórum de Liderança em Sequestro de Carbono em nível ministerial para promover a cooperação internacional e parcerias público-privadas para o desenvolvimento do CCS” (UNRUH e CARRILLO-HERMOSILLA, 2006, p. 1191-1192).

<sup>14</sup> Define-se o CCUS como um processo que “envolve capturar o dióxido de carbono criado pela combustão de gás ou outros combustíveis em usinas elétricas e em outros lugares, e usá-lo de uma maneira agregadora de valor que também inclui manter o CO<sub>2</sub> da atmosfera, como recuperação avançada de petróleo ou outros processos industriais ou armazená-lo no subsolo” (tradução livre) (BP TECHNOLOGY OUTLOOK, 2018, p. 9).

absorção (COHEN e LEVINTHAL, 1989) e irá se apropriar desse conhecimento por meio do sistema patentário.

A riqueza das informações contidas nos dados de patentes permite avaliar as competências tecnológicas das *Oil Carbon Majors* selecionadas<sup>15</sup>. O rastreamento de dados pelos códigos da *International Patent Classification* (IPCs) atribuídos a patente é possível avaliar sua qualidade. A partir desses dados desagregados, classificam-se as patentes de acordo com o campo tecnológico ao qual a patente foi depositada, que revela o tipo de tecnologia empregada e o esforço tecnológico da empresa.

As patentes de cada empresa são oriundas da base de patentes *Derwent Innovation Index*<sup>16</sup>, no período entre 1963 e 2017, e classificadas de acordo com as classes tecnológicas em todos os campos tecnológicos verdes. O nível de desagregação da pesquisa, a nove dígitos segundo a IPC, classificadas pela *World Intellectual Property Organisation* (WIPO), possibilita investigar as competências tecnológicas com maior riqueza de informação sobre o conhecimento tecnológico que as empresas detém. De maneira análoga, Gonçalves (2014) analisou as competências tecnológicas da empresa WEG (setor de motores elétricos brasileiros) em comparação aos seus principais concorrentes globais, a partir dos códigos IPCs com o nível de desagregação de quatro dígitos.

Os dados coletados são agrupados em domínios e subdomínios tecnológicos (campos tecnológicos) a partir do algoritmo de correspondência *Green Inventory IPC* elaborado pela WIPO. As tecnologias verdes estão espalhadas em diferentes campos técnicos do conhecimento e a proposta da WIPO foi reunir os códigos em um inventário que pudesse auxiliar as pesquisas e coletas de dados sobre patentes verdes. O inventário verde, portanto, tem o intuito de facilitar as buscas de patentes associadas a “tecnologias ambientalmente saudáveis” conforme listado pela *Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima* (UNFCCC)<sup>17</sup>. A tabela 1 mostra a participação das patentes relacionadas às atividades tecnológicas ambientalmente saudáveis das 20 *Oil Carbon Majors* selecionadas.

**Tabela 1 – Total de patentes e patentes verdes das 20 *Oil Carbon Majors*, participação das patentes verdes no total de patentes (1963-2017)**

Empresas	País	Total de Patentes	Total de Patentes Verdes	Participação das Patentes Verdes no Total
Saudi Aramco	Arábia Saudita	1.396	287	20,56%
Sasol	África do Sul	604	86	14,24%
Pemex*	México	424	55	12,97%
Statoil	Noruega	1.408	162	11,51%
Repsol	Espanha	224	24	10,71%
Lukoil	Rússia	313	33	10,54%
Gazprom	Rússia	1.448	151	10,43%
BHP Billiton	Austrália	754	75	9,95%
ConocoPhillips	EUA	3.631	355	9,78%
Total	França	5.000	477	9,54%
ENI	Itália	2.493	224	8,99%
Shell	Holanda	18.349	1.616	8,81%
Occidental	EUA	1.182	104	8,80%
BP	Reino Unido	5.617	440	7,83%
ExxonMobil	EUA	17.980	1.377	7,66%
Chevron	EUA	7.035	527	7,49%
Sinopec	China	48.434	3.511	7,25%
Petrobras	Brasil	1.552	109	7,02%
Marathon	EUA	983	52	5,29%
PetroChina	China	39.293	1.737	4,42%

\*Inclui o Instituto Mexicano Del Petroleo

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da *Derwent*.

<sup>15</sup> As 20 *oil carbon majors* são: *Chevron, ExxonMobil, Saudi Aramco, BP, Gazprom, Shell, Pemex, Lukoil, Total, PetroChina, BHP Billiton, ENI, Petrobras, Occidental, Statoil, Lukoil, Sasol, Repsol, Marathon, Sinopec*. A seleção das 20 empresas se deu a partir da análise do portfólio total de patentes da empresa, cujas possuíam um número superior a 100 patentes e seu posicionamento no total das emissões globais. Ou seja, as petrolíferas maiores poluidoras e que possuía um número significativo de patentes.

<sup>16</sup> A escolha da base se deve pela facilidade da comparabilidade dos registros de patentes, com cobertura maior em termos mundiais. Essa ferramenta de busca, que pertence a Web of Science/Clarivate Analytics, apresenta dados de patentes desde 1963 de 41 autoridades emissoras de patentes de todo o mundo. Ver mais em [http://ips.clarivate.com/m/pdfs/DII\\_qrc\\_port\\_dec08.pdf](http://ips.clarivate.com/m/pdfs/DII_qrc_port_dec08.pdf)

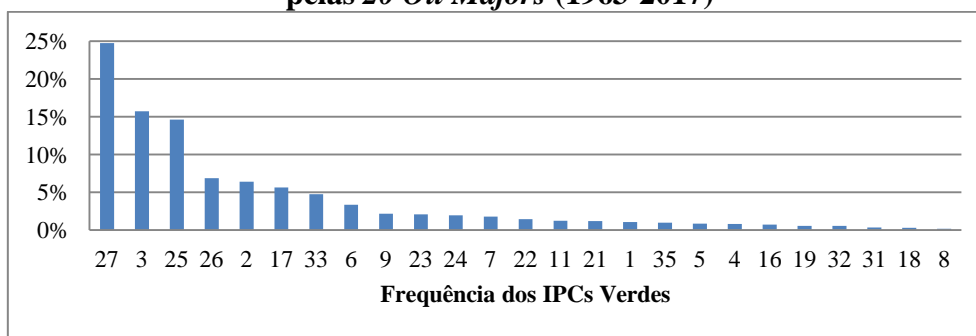
<sup>17</sup> Sítio institucional do *IPC Green Inventory*: [http://www.wipo.int/classifications/ipc/en/green\\_inventory/](http://www.wipo.int/classifications/ipc/en/green_inventory/).



Em termos relativos, a estatal saudita *Saudi Aramco* tinha a maior participação em patentes verdes entre as empresas selecionadas com cerca de 20,56% do total do seu portfólio. A menor participação era da chinesa *PetroChina* (4,42%). Entretanto, termos absolutos a chinesa tinha o segundo maior número de patentes verdes (1.737 patentes verdes) atrás somente da, *Sinopec* (também chinesa), que tinha um número de 3.511 patentes verdes, entre 1987 e 2017. Em seguida, destacam-se com maiores números de patentes verdes as empresas *Shell* (1.616) e *ExxonMobil* (1.377). As participações das patentes ambientalmente saudáveis das quatro *tops oil carbon majors* privadas, eram: *Chevron* (7,49%), *ExxonMobil* (7,66%), *BP* (7,83) e *Shell* (8,81%). Em termos absolutos, as empresas *Shell* e *ExxonMobil* tinham números superiores as das outras empresas, revelando um esforço tecnológico em atividades tecnológicas verdes superiores aos das duas concorrentes (Tabela 1).

O campo tecnológico com maior patenteamento das patentes verdes dessas empresas pode ser encontrado no gráfico 1, o qual mostra a frequência dos códigos IPCs no campo técnico delimitado pela WIPO. Observa-se que as *oil carbon majors* estão com maior envolvimento em atividades tecnológicas relacionadas ao controle da poluição da água (campo 27) (24,75% dos códigos IPCs). Sendo que as empresas com maior patentes nesse campo são a *Sinopec* (com 46,6% dos códigos IPCs nesse referido campo), *PetroChina* (40% dos códigos), *Shell* (7,54%) e *ExxonMobil* (8,54%).

**Gráfico 1 – Frequência dos códigos IPCs Verdes mais patenteados pelas 20 Oil Majors (1963-2017)**



Nota: (1) Biocombustíveis, (2) Pilha de combustível, (3) Energia (aproveitada) de resíduos artificiais, (4) Energia hídrica, (5) Energia eólica, (6) Energia solar, (7) Energia geotérmica, (8) Outra produção ou utilização de calor natural, (9) Utilização de calor residual – **Domínio 1 (Produção de Energia Alternativa)**; (11) Veículos em geral e suas partes – **Domínio 2 (Transporte)**; (16) Armazenamento de energia elétrica, (17) Circuito de fornecimento de energia, (18) Iluminação de baixa energia (LED), (19) Isolamento térmico de edifícios, em geral – **Domínio 3 (Conservação de Energia)**; (21) Depósito de resíduos, (22) Tratamento de resíduos, (23) Consumo de resíduos por combustão, (24) Reutilização de materiais residuais, (25) Captura e armazenamento de carbono, (26) Gestão da qualidade do ar, (27) Controle da poluição da água – **Domínio 4 (Gestão de Resíduos)**; (31) Alternativas de pesticidas, (32) Melhorias do solo e adubos de fontes residuais – **Domínio 5 (Agricultura / Florestal)**; (33) Migração pendular / Comércio e emissão de carbono – **Domínio 6 (Aspectos Administrativos, Regulamentares ou Design)**; (35) Engenharia nuclear – **Domínio 7 (Geração de Energia Nuclear)**.

Fonte: Elaboração própria com base nos resultados da pesquisa.

É imperativo observar que há um grau de concentração no patenteamento das empresas chinesas. De acordo com o índice de diversificação tecnológica<sup>18</sup> a *Sinopec* tinha um índice de 0,74 e a *PetroChina* um índice de 0,79. Em comparação, a empresa mais diversificada tecnologicamente em atividades verdes era a *BHP Billiton* com índice de 0,92 (com patenteamento em 25 dos 36 campos do conhecimento técnico), seguidos pelas *BP* e *Chevron* com índices de 0,89.

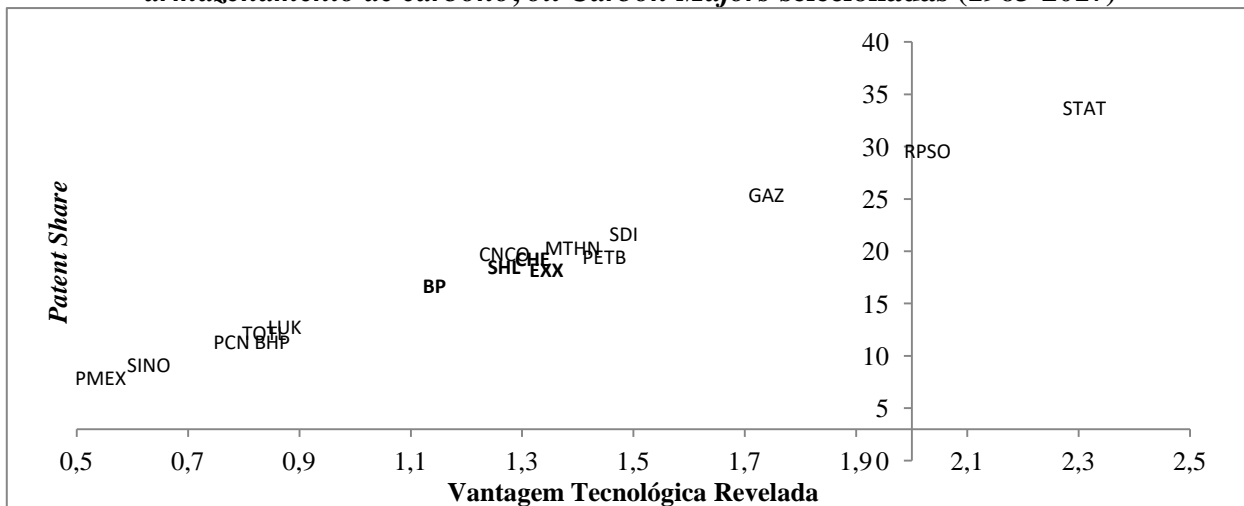
O segundo campo com maior patenteamento das empresas foi observado no domínio de energias alternativas nas atividades relacionadas ao aproveitamento de energia a partir de resíduos artificiais (3) (com 15,70% dos IPCs). Já a tecnologia de CCS é a terceira mais patenteada pelas 20 *Carbon Majors* empresas de petróleo e gás. Como já mencionado, observa-se um grande protagonismo das tecnologias associadas à CCS no âmbito das negociações climáticas. As competências tecnológicas das empresas nesse campo estão relacionados no gráfico 2.

<sup>18</sup> O Índice de Diversificação Tecnológica é elaborado com base no índice tradicional de concentração de Herfindahl-Hirschman (HHI) (CHIU *et al.*, 2008). Subtraindo o indicador de HHI da unidade, obtém-se o indicador de diversificação tecnológica, que varia de 0 a 1 e é interpretado da seguinte forma: quanto mais próximo de zero, menor é a diversidade tecnológica e, quanto maior o índice, mais diversificado tecnologicamente é a empresa. Dessa forma, a fórmula pode ser expressa:  $DIV = 1 - \sum_{i=1}^{364} \left(\frac{P_{ij}}{P_j}\right)^2$ .



Para mensurar as competências tecnológicas das *Oils Carbon Majors* utiliza-se o indicador de vantagem tecnológica revelada (VTR)<sup>19</sup>, proposto por Patel e Pavitt (2001) ao nível da empresa. O emprego deste indicador permite verificar a existência de vantagem comparativa, da empresa, na referida área tecnológica (em cada um dos 36 subdomínios tecnológicos proposto por esse trabalho).

**Gráfico 2 – Perfil tecnológico baseado em estatísticas de patentes no campo *Captura e armazenamento de carbono*, *oil Carbon Majors* selecionadas (1963-2017)**



Nota: As siglas das empresas que aparecem nos gráficos: *Chevron* (CHE), *BHP Billiton* (BHP), *British Petroleum* (BP), *ConocoPhillips* (CNCO), *ExxonMobil* (EXX), *Gazprom* (GAZ), *Lukoil* (LUK), *Marathon* (MTHN), *Pemex* (PMEX), *Petrobrás* (PETB), *PetroChina* (PCN), *Repsol* (RPSO), *Saudi Aramco* (SDI), *Shell* (SHL), *Sinopec* (SINO), *Statoil* (STAT), *Total* (TOTL).

Fonte: Elaboração própria.

Assim, o VTR da empresa *j* no campo tecnológico *i* é calculado pela razão entre a participação do número de patentes depositadas pela empresa *j* no campo *i* e a participação do número total de patentes agregadas depositadas pela empresa no total de patentes de todas as empresas em todos os campos tecnológicos. O indicador VTR assume valores no intervalo  $[0, \infty[$ .

Conjuntamente, a participação das patentes no total de patentes verdes (*patent share*) e VTR podem verificar o percentual que as patentes no campo *i* representam no total das patentes obtidas pela empresa *j*. Assim define-se qual a importância deste campo no perfil de competências tecnológicas da empresa *j*.

Essa associação, proposta por Patel e Pavitt (2001), poderá identificar o campo tecnológico como sendo competências: central (Quadrante I), de base (Quadrante II), marginal (Quadrante III) e nicho (Quadrante IV), no conjunto de competências tecnológicas que a empresa detém. Esse tipo de estratégia metodológica traz elementos para a compreensão de competências tecnológicas das empresas selecionadas.

As competências tecnológicas em atividades de CCS são consideradas competências centrais para duas das empresas pesquisadas, a norueguesa *Statoil* (STAT) e a espanhola *Repsol* (RPSO), para as demais 15 empresas, são classificadas como competências de base, sendo que três (*Eni*, *Occidental* e *Sasol*) não possuem competências nesse campo em relação aos seus competidores (Gráfico 2). Destaca-se que dentre as quatro petroleiras privadas maiores poluidoras, três delas (*Chevron*, *Exxon* e *Shell*) possuem um perfil tecnológico similar, juntamente com a brasileira *Petrobrás* (Gráfico 2). O posicionamento da BP fica bem próximo dessas empresas (Gráfico 2). A BP destaca-se por ser uma grande investidora e idealizadora de projetos correlatos a essa tecnologia, como supracitado.

Esses resultados evidenciam a importância desse campo tecnológico no conjunto de capacitações tecnológicas construídos pelas empresas no período analisado. Além das sinalizações, por meio da

<sup>19</sup>  $VTR_{ij} = \frac{P_{ij} / \sum_j P_{ij}}{\sum_i P_{ij} / \sum_{ij} P_{ij}}$

coalizão OGCI, as estatísticas de patentes revelam sobremaneira o interesse de produtoras de petróleo no patenteamento em tecnologias para a captura e armazenamento do carbono.

Segundo informações da BP, um dos destinos de P&D e esforços tecnológicos da empresa estão centrados na aplicação da tecnologia que aprimora a integridade operacional, aumenta a eficiência da conversão energética, reduz as emissões de CO<sub>2</sub> ou ajuda a fornecer produtos de alto desempenho para seus clientes. Além disso, a BP está trabalhando em parceria com as empresas membros da OGCI para acelerar o uso em larga escala da captura, uso e armazenamento de carbono, que é uma das principais áreas de foco de investimento da coalizão (em torno de US\$ 1 bilhão)<sup>20</sup> (BP, 2017; DUDLEY, 2017). De acordo com o BP Technology Outlook (2018), a produção de gás natural da empresa envolve um processo de descarbonização que é alcançado por meio da aplicação do CCUS, bem como pela sua mistura com hidrogênio ou biogás produzido a partir de materiais biológicos.

A empresa admite que o processo de descarbonização a partir do processo de CCUS não está projetado para seguir em um ritmo comparável à inovação digital<sup>21</sup>, produção de energias renováveis ou armazenamento de energia. Entretanto, constitui-se uma agenda de pesquisa promissora que sugerem que num futuro próximo esse processo terá um papel importante no *mix* de energia mais rentável. Dessa maneira, colocar um preço no carbono poderia impulsionar a implantação em larga escala (BP TECHNOLOGY OUTLOOK, 2018).

O que se observa, portanto, é a adoção de estratégias, por partes das empresas de petróleo e gás, com vistas à criação de um mercado, num futuro próximo, para tecnologias de captura estoque e uso do carbono. Essa estratégia pode ser aquilatada pela observação do aumento do número de patentes que as petrolíferas vêm produzindo em CCS nos últimos anos. Dessa maneira, as petrolíferas estão sinalizando e acreditando nas possibilidades do aprofundamento do *lock-in* do carbono.

Dessa maneira, a patente é uma das estratégias tecnológicas adotadas pelas empresas para garantir o aprofundamento do *lock-in* do carbono. Além de garantir um monopólio por tempo determinado, a patente pode ser vista como um produto da inovação e suas estatísticas e informações contidas nos documentos de patentes servem como um indicador da inovação. Apesar desse indicador sofrer delimitações já conhecidas, ainda traz valiosas evidências sobre os esforços tecnológicos e aprendizado das empresas (NAGAOKA, MOTOHASHI E GOTO, 2010).

#### 4. Considerações finais

O objetivo desse artigo foi desenvolver uma discussão sobre os desafios enfrentados por políticas públicas e estratégias corporativas direcionadas ao rompimento do *lock-in* das sociedades a um padrão de desenvolvimento caracterizado, do ponto de vista energético, por sua dependência em relação aos combustíveis fósseis. Procurou-se recuperar o debate sobre transições em uma leitura neo-Schumpeteriana, principalmente acerca do aprisionamento das civilizações ao paradigma técnico-econômico-institucional carbono-intensivo.

A discussão dos sistemas energéticos demonstra que, pela própria composição do sistema e pelos interesses dos agentes socioeconômicos que se estabelecem em torno a ele, cria-se um *lock-in* que não é apenas de natureza tecnológica, mas um *lock-in* que também possui características de ordem econômica e institucional. Observou-se fortemente a interdependência dos sistemas energéticos, da era pré-industrial a moderna, que se constituiu um grande desafio para as sociedades transitarem de fontes energéticas tradicionais e menos eficientes para fontes com maior intensidade energética e menores custos de produção.

A teoria evolucionária versa que as mudanças de natureza técnica e institucional auxiliam na redução de custos econômicos e sociais que possibilitam o conforto e confiabilidade social nos sistemas energéticos adotados pelos países. Por outro lado, a disseminação do projeto dominante ou padrão tecnológico causa uma inércia à mudança, ou seja, as sociedades que fizeram suas escolhas e constituição

<sup>20</sup> Os investimentos da coalizão são destinados, além do CCUS, à redução das emissões de metano, redução das emissões de transporte, melhoramento da eficiência energética na indústria (Fonte: sítio institucional da OGCI).

<sup>21</sup> De acordo com BP Technology Outlook (2018, p. 9) “a digitalização tem a capacidade de atingir novos tipos e níveis de eficiência energética, desde redes inteligentes e gerenciamento de demanda em sistemas de energia até veículos autônomos e compartilhamento de carona que otimizam o uso de veículos e menor consumo de combustível”.

de sua matriz energética ficam, por vezes, *aprimoradas* e são difíceis de serem quebradas. Países que não adotaram um padrão energético consolidado são passíveis de uma transição mais facilitada. Transição essa que cada vez mais está condicionada a uma otimização do sistema energético em suas estruturas de eficiência conjugada a um engajamento de redução da poluição global.

Observam-se recentemente nos estudos energéticos grandes esforços de pesquisa e aprimoramento tecnológicos nas formas de captura e armazenamento de carbono. A BP é uma empresa que tem ido nessa direção com maior intensidade do que na produção de energias renováveis, por exemplo. As estatísticas de patentes trazem evidências do protagonismo dessa tecnologia no cenário das mudanças climáticas, uma vez que revelam a importância dessa tecnologia no conjunto de capacitações tecnológicas que as empresas de petróleo e gás vêm construindo ao longo do período de 1963 a 2017. Essas tecnologias reforçam o *aprisionamento (lock-in)* do carbono, uma vez que se consegue capturar e estocar (em alguns casos, também utilizar) o dióxido de carbono, atendendo, portanto, às exigências das políticas de mudanças climáticas, além de cumprir um papel de emissões zero.

Nesse sentido, as estratégias das empresas em desenvolver tecnologias e competências em CCS, além de aprofundar o *lock-in*, dando uma sobrevida ao paradigma fóssil-intensivo, significam transformações evolucionárias. Um caráter revolucionário para a transição energética dependeria de transformações muito mais profundas dos três elementos que compõem o sistema dominante, ou seja, na energia primária, nos *prime movers* e nas infraestruturas. Substantivas mudanças seriam necessárias do ponto de vista material do sistema e das dimensões imateriais, como o quadro institucional e os estilos de vida que estão na base das formas de uso da energia.

O assunto de mudanças revolucionárias, no entanto, não pode ser tratado nos limites deste artigo, requerendo a ampliação do espaço para a discussão e a mobilização de outras ideias e da contribuição de outros autores. A julgar pelas discussões mais recentes sobre a dimensão do chamado “*gap* de emissões” e a correspondente urgência da transição energética, esse assunto – das mudanças revolucionárias – é inadiável.

Nesse sentido, abre-se uma agenda de pesquisa que vise investigação das influências e impactos das tecnologias verdes, principalmente as estratégias de empresas grandes poluidoras globais, como é o caso das Oil Carbon Majors. Trabalhos futuros visam ampliar conceitos e análises aqui empregados.

### Referências bibliográficas

- ARAÚJO, Kathleen. The emerging field of energy transitions: progress, challenges, and opportunities. **Energy Research & Social Science**, v. 1, p. 112-121, 2014.
- ARTHUR, W. Brian. Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. **The economic journal**, v. 99, n. 394, p. 116-131, 1989.
- ARTHUR, W. Brian. Positive feedbacks in the economy. **The McKinsey Quarterly**, n. 1, p. 81, 1994.
- BP TECHNOLOGY OUTLOOK. **How technology could change the way energy is produced and consumed**. 2018. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/technology/bp-technology-outlook-2018.pdf>>. Acesso em 13 abr. 2018.
- BRITISH PETROLEUM – BP. **Annual Report 2017**. Londres, Reino Unido, 2017, 300f. Disponível em <<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/investors/bp-annual-report-and-form-20f-2017.pdf>>. Acesso em 30 abr. 2018.
- CHIU, Yi-Chia *et al.* Technological diversification, complementary assets, and performance. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 75, n. 6, p. 875-892, 2008.
- COHEN, Wesley M.; LEVINTHAL, Daniel A. Innovation and learning: the two faces of R & D. **The economic journal**, v. 99, n. 397, p. 569-596, 1989.
- DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. **Research policy**, v. 11, n. 3, p. 147-162, 1982.
- DOSI, G. The nature of the innovative process. In: DOSI, G. *et al.* (Org.). **Technical change and economic theory**. London: Pinter, 1988.
- DUDLEY, B. **BP Strategy Update**. 2017. Disponível em <<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/investors/bp-strategy-update-2017-slides.pdf>>. Acesso em 13 abr. 2018.

FREEMAN, C. **Technology policy and economic performance: lessons from Japan**. London : Pinter, 1987.

FREEMAN, C.; PEREZ, C., 1988. Structural crisis of adjustment: business cycles and investment behaviour. **Technical Change and Economic Theory**. Pinter, London, p. 38-66.

GRUBLER, A. Energy Transitions. In: Cleveland, C.J. (Org.), *Encyclopedia of Earth*. Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment, Washington, DC. 2008. Disponível em: <[https://editors.eol.org/eoearth/wiki/Energy\\_transitions](https://editors.eol.org/eoearth/wiki/Energy_transitions)>. Acesso em: 10 abr. 2018.

GRUBLER, Arnulf. Energy transitions research: Insights and cautionary tales. *Energy Policy*, v. 50, p. 8-16, 2012.

HEEDE, Richard. Tracing anthropogenic carbon dioxide and methane emissions to fossil fuel and cement producers, 1854–2010. **Climatic Change**, v. 122, n. 1-2, p. 229-241, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Energy System. In: **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Editado por Edenhofer, Ottmar et al. Cambridge/New York, Cambridge University Press/IPCC, 2014b. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf)>. Acesso em: 02 jun. 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Stationary combustion. In: **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, 2006.

KUHN, T. **The structure of scientific revolutions**. Chicago: Chicago University Press, 1962.

LA ROVERE, R. L. Paradigmas e trajetórias tecnológicas. In: PELAEZ, V.; SZMRECSÁNYI, T. (Org.). **Economia da Inovação Tecnológica**. São Paulo: Hucitec, 2006. p. 285-301.

MARIA, M. R. **Explorando o desenho de políticas públicas mais sustentáveis: é possível a transição energética de baixo-carbono?** 2017. 190f. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017. Disponível em <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/330925>>. Acesso em 20 jun. 2018.

NAGAOKA, Sadao; MOTOHASHI, Kazuyuki; GOTO, Akira. Patent statistics as an innovation indicator. In: **Handbook of the Economics of Innovation**. North-Holland, 2010. p. 1083-1127.

O'CONNOR, Peter. Energy transitions. **The Pardee Papers Working Paper**, n.12, 2010.

PATEL, P.; PAVITT, K. How Technological Competencies Help Define the Core (not the Boundaries) of the Firm. In **The Nature and Dynamics of Organizational Capabilities**. (Org.) Dosi, Giovanni; Nelson, Richard R.; Winter, Sidney, 2001.

PATEL, P.; PAVITT, K. Patterns of Technological Activity: their Measurement and Interpretation. P. Stoneman (Ed.). **Handbook of the Economics of Innovation and Technical Change**. Oxford, Blackwell, 1995.

PEREZ, C. Structural change and assimilation of new technologies in the economic and social systems. **Futures**, v. 15, n. 5, p. 357-375, 1983.

PEREZ, C. Technological revolutions and techno-economic paradigms. **Cambridge journal of economics**, v.34, n.1, p.185-202, 2009.

SMIL, Vaclav. Examining energy transitions: a dozen insights based on performance. **Energy Research & Social Science**, v. 22, p. 194-197, 2016.

SMIL, Vaclav. **Energy transitions: history, requirements, prospects**. ABC-CLIO, 2010a.

SMIL, Vaclav. **Prime movers of globalization: The history and impact of diesel engines and gas turbines**. MIT press, 2010b.

SOVACOOOL, Benjamin K. The history and politics of energy transitions: Comparing contested views and finding common ground. **WIDER Working Paper 2016/81**. 2016.

UNRUH, Gregory C. Escaping carbon lock-in. **Energy policy**, v. 30, n. 4, p. 317-325, 2002.

UNRUH, Gregory C. Understanding carbon lock-in. **Energy policy**, v. 28, n. 12, p. 817-830, 2000.

UNRUH, Gregory C.; CARRILLO-HERMOSILLA, Javier. Globalizing carbon lock-in. **Energy Policy**, v. 34, n. 10, p. 1185-1197, 2006.

WILSON, Charlie; GRUBLER, Arnulf. Lessons from the history of technological change for clean energy scenarios and policies. **Natural Resources Forum**, v. 35, n. 3, p. 165-184, 2011.