

**ENEI**

Encontro Nacional de Economia Industrial e Inovação

FACE-UFMG

Inovação, Sustentabilidade e Pandemia

10 a 14 de maio de 2021

Tecnologias emergentes em setores tecnologicamente maduros? Explorando a emergência do processamento submarino de petróleo e gás natural sob a perspectiva dos sistemas tecnológicos de inovação (1990-2019)

Matheus Gonçalves da Silva Pereta (DPCT-Unicamp);

André Tosi Furtado (DPCT-Unicamp);

Janaína Oliveira Pamplona da Costa (DPCT-Unicamp)

resumo:

Este artigo explora o processo de emergência do sistema de processamento submarino na indústria mundial de petróleo e gás natural entre 1990-2019. São considerados cinco subsistemas relacionados ao SPS: compressão submarina de gás; estimulação submarina; separação submarina; tratamento e (re)injeção e aquecimento ativo das linhas de fluxo. A fim de compreender como a dinâmica de interação entre os atores e instituições envolvidos em atividades de inovação em SPS se articula com o seu processo de emergência tecnológica, realizou-se uma análise das funções dos sistemas tecnológicos de inovação (STI), a partir de dados de projetos demonstrativos, publicações científicas e patentes. Os principais resultados da análise das funções do STI identificaram que a atividade experimental, a produção e difusão de novos conhecimentos operam positivamente para a emergência do SPS no período analisado, enquanto a orientação da busca e a criação de legitimidade se caracterizam como falhas sistêmicas que explicam, parcialmente, as barreiras à difusão dessas tecnologias emergentes (TE) no setor. Sendo assim, este trabalho se propõe a contribuir para o debate sobre políticas públicas e inovação em setores estabelecidos, além de refletir sobre o papel dos países em desenvolvimento em áreas tecnológicas emergentes.

palavras-chave:

Tecnologias emergentes; Sistema tecnológico de inovação; Funções dos sistemas de inovação; Indústria do petróleo *offshore*; Equipamentos de produção submarina

Código JEL: O31; O33

Área Temática: 4.3 Sistemas de inovação – nacional, regional, setorial, tecnológico

1. Introdução

O direcionamento do progresso industrial no regime sociotécnico baseado em sistemas intensivos em carbono tem sido criticado desde a segunda metade do século XX quando os efeitos desse modelo de crescimento foram reconhecidos como desafios societários a ser superados. Estes, por sua vez, dizem respeito às mudanças ambientais globais e o aumento da desigualdade, inclusive no interior de países considerados desenvolvidos (KANGER; SCHOT, 2019). As emissões antropogênicas de gases do efeito estufa (GEE), sobretudo, a liberação do dióxido de carbono (CO_2) proveniente da queima de combustíveis fósseis, estão diretamente associadas às mudanças climáticas. Nesse contexto, torna-se urgente transformar os sistemas energéticos das sociedades contemporâneas, vislumbrando a adoção de novas fontes de energia renovável. Esse processo visa reconfigurar a matriz energética mundial que depende de combustíveis fósseis poluentes como o carvão mineral e o petróleo.

Entretanto, três desafios à transição energética atual estão colocados frente às incertezas sobre a capacidade das energias renováveis substituírem as fontes tradicionais: (i) a ampliação do acesso à energia das populações em situação de vulnerabilidade; (ii) a garantia de segurança energética às sociedades que iniciaram o processo de transformação de seus sistemas energéticos em direção a uma matriz energética renovável e (iii) a necessária redução das emissões dos GEE em paralelo à ampliação do acesso à energia. Dessa forma, a participação de combustíveis fósseis na matriz energética mundial deve se manter proeminente até a década de 2050 (BP, 2019; IEA, 2018). Nesse contexto de petrodependência, é mister abandonar o carvão mineral e desenvolver recursos fósseis menos poluentes como o gás natural, ao passo que a indústria do petróleo e gás natural (IPGN) deve estabelecer estratégias de mitigação de emissões de suas atividades de exploração e produção¹ (E&P).

O segmento de E&P *offshore*² em regiões de lâminas d'água (LDA) profundas e ultra-profundas³ tem sido a principal frente de expansão tecnológica da IPGN (ZHANG et al., 2019), viabilizando atividades extrativas em regiões de fronteira exploratória, tais quais, o pré-sal e o Ártico. As águas profundas estabeleceram uma mudança de paradigma tecnológico nessa indústria (NETO; SHIMA, 2008). Desde a década de 1950, a coevolução de trajetórias tecnológicas em sísmica, perfuração e plataformas de produção viabilizaram a E&P em mar aberto (KEMP, 2013a; 2013b). Por sua vez, a E&P em águas profundas é resultado da diversificação de rotas tecnológicas e a combinação de tecnologias incumbentes e emergentes na IPGN durante os anos 1970 e 1980. O aumento da profundidade de LDA das atividades *offshore* desencadeou um processo de 'marinização'⁴ dos equipamentos e sistemas de produção de petróleo e gás natural. O elevando grau de complexidade das operações em LDA muito profundas engendrou o processo de desenvolvimento de artefatos tecnológicos que precisavam ser dispostos no leito ou sob o solo marinho (JONES, 1995).

A dinâmica tecnológica da IPGN *offshore* teve efeito direto no desenvolvimento de uma indústria de equipamentos submarinos (IES) que desenvolve soluções tecnológicas dedicadas a auxiliar o controle da produção e o transporte de fluídos. No escopo da IES, os sistemas submarinos de produção representam a atual fronteira tecnológica desse setor (BAI; BAI, 2018). Desde a década de 1990, a IPGN desenvolve um conjunto de tecnologias emergentes (TE) no escopo dos sistemas submarinos de produção, a saber, os sistemas de processamento submarino de petróleo e gás natural (SPS). Originalmente, o SPS foi compreendido como uma tecnologia disruptiva em relação ao paradigma tecnológico da E&P *offshore*, visando descontinuar o uso das plataformas de produção, através da integração de subsistemas de bombeio, compressão, separação, tratamento, regulação e controle elétrico dos sistemas de produção em uma arquitetura conceitual denominada 'usina submarina'. O SPS tem sido acoplado aos sistemas de produção dominantes, sendo aplicado em atividades de recuperação avançada de petróleo e gás em campos maduros; tratamento elétrico de elementos contaminantes nos fluídos produzidos; separação e injeção de CO_2 associado às atividades de E&P (BAI; BAI, 2018; MASON, 2006; RUUD et al., 2015). Sendo assim, a emergência do SPS pode não apenas dinamizar um setor industrial considerado tecnologicamente maduro (LANDES, 2010), mas também impulsionar o desenvolvimento de novas tecnologias de produção de petróleo e gás natural alinhadas à mitigação das emissões diretas das atividades de E&P, responsáveis por

¹ A E&P de petróleo e gás natural está relacionada ao conjunto de operações destinadas à exploração (prospecção de jazidas e perfuração de poços exploratórios) e produção (extração comercial das acumulações de hidrocarbonetos identificadas na fase de exploração).

² As operações de E&P podem ocorrer em terra (*onshore*) ou na água (*offshore*).

³ As operações *offshore* podem ser desenvolvidas em águas rasas – LDA de até 400 metros; águas profundas – LDA entre 401 e 1.500 metros – e, águas ultra-profundas – LDA superiores a 1.500 metros.

⁴ Processo de criação de projetos, desenvolvimento e teste de artefatos tecnológicos especificamente projetados para aplicações submarinas em médio e longo-prazo.

8% das emissões globais de CO₂, somente no ano de 2015 (MCKINSEY, 2020).

Ainda que as expectativas positivas geradas pelo SPS tenham sido convertidas em atividades de pesquisa, desenvolvimento e demonstração (P&D&D) nos últimos trinta anos, essas tecnologias ainda não se difundiram amplamente pela IPGN. Dessa forma, este artigo se propõe a responder como o processo de emergência do SPS é influenciado pela evolução do sistema tecnológico de inovação (STI). Sendo assim, o objetivo desse artigo é identificar e investigar os processos que impactam a geração, desenvolvimento, uso e difusão dessas TE através de uma análise das funções do STI global em processamento submarino, entre 1990 e 2019. O artigo está organizado em mais sete seções, além desta introdução. A segunda seção apresenta o enquadramento conceitual-analítico, discutindo TE e os STI. Na terceira seção, é apresentado o *background* tecnológico. A quarta seção apresenta os procedimentos metodológicos utilizados na análise das funções do STI em processamento submarino de petróleo e gás natural realizada na quinta seção. Na sexta seção, elabora-se uma interpretação das relações entre o desempenho das funções do STI e o processo de emergência do SPS. Por fim, a título de considerações finais, são apresentadas as principais conclusões deste artigo.

2. A emergência de TE e a abordagem dos STI

A mudança tecnológica apresenta um caráter intrinsecamente interativo em que a transformação da invenção em inovação depende da convergência de diferentes tipos de conhecimentos, capacidades, habilidades e recursos por parte dos atores em um contexto institucional (FAGERBERG, 2004). Esta perspectiva da mudança tecnológica condiciona uma reflexão sobre o processo de emergência de uma TE. Por TE, entende-se,

“uma tecnologia radicalmente nova e com um ritmo de desenvolvimento relativamente rápido, caracterizada por um certo grau de coerência persistente no tempo e com potencial para exercer um impacto considerável no(s) domínio(s) socioeconômico(s) observado(s) em termos de composição de atores, instituições e padrões de interação entre esses, juntamente com os processos associados à produção de conhecimentos. Seu impacto mais proeminente, no entanto, encontra-se no futuro e, assim, enquanto ocorre sua fase de emergência, é tanto incerta, quanto ambígua”(ROTOLO; HICKS; MARTIN, 2015, pp. 1828, tradução nossa).

O Quadro 1 caracteriza os atributos das TE em relação às fases do processo de sua emergência. Na fase de pré-emergência, uma TE é radicalmente nova em relação à configuração tecnológica hegemônica no domínio ao qual ela surge. Contudo, seu impacto proeminente é pequeno. A arquitetura conceitual da tecnologia é incoerente; conseqüentemente, seu ritmo de desenvolvimento é lento, tendo em vista os altos índices de incerteza e ambiguidade associados ao futuro dessa nova tecnologia. Durante a fase de pré-emergência, as TE não apresentam, nem de maneira aproximada, suas características finais de desempenho. Na fase de emergência, algumas trajetórias tecnológicas relacionadas às TE são conformadas, orientando o desenvolvimento da tecnologia em direções selecionadas; por um lado, os níveis de coerência da TE aumentam, por outro, a inauguração de trajetórias tecnológicas limitam as possibilidades da nova tecnologia, diminuindo os níveis de novidade radical. Durante a fase de emergência, o aumento das atividades de desenvolvimento pode gerar expectativas positivas sobre o impacto futuro das TE, bem como diminuir incertezas e ambiguidades sobre as mesmas. Por fim, na fase de pós-emergência, o impacto da TE é sentido no momento em que a mesma se consolida como um sistema incumbente marcado por um desenho tecnológico dominante e coerente. Por se tratar de uma tecnologia com baixos níveis de incerteza e ambiguidade, seus níveis de novidade radical são baixos, ou inexistentes. O ritmo de desenvolvimento da TE é muito lento, se limitando a inovações de caráter incremental (ARTHUR, 2007, 2009; ROTOLO; HICKS; MARTIN, 2015).

Para compreender os processos dinâmicos do processo descrito acima, a operacionalização do conceito de TE neste artigo está articulada à abordagem sistêmica da inovação que enfatiza o aprendizado dos atores e a interdependência das atividades inovativas ao largo do processo de inovação. Mais precisamente, na abordagem dos sistemas tecnológicos de inovação (STI) (CARLSSON; STANKIEWICZ, 1991). Entre os anos 1990 e 2000, uma primeira onda de estudos dos STI se debruçou sobre indústrias existentes com objetivo de avaliar sua habilidade de gerar novas tecnologias, visando recomendações de políticas para melhorar o desempenho da inovação (AUTIO; HAMERI, 1995; CARLSSON, 1997; CARLSSON et al., 2002). Nos últimos anos, o escopo de análise dos STI passou a se interessar pela formação de novas indústrias, investigando o co-desenvolvimento do sistema de inovação e a tecnologia-focal (BENTO; FONTES, 2019; FURTADO; HEKKERT; NEGRO, 2020; MÄKITIE et al., 2018).

Quadro 1 - Descrição dos atributos de uma TE em referência ao seu processo de emergência

Atributo	Descrição	Fase do processo de emergência tecnológica		
		Pré-emergência	Emergência	Pós-emergência
Novidade radical	Grau de novidade dos princípios básicos utilizados por uma nova tecnologia em relação às tecnologias estabelecidas para realizar uma determinada função.	Radicalmente novo	Considerável	Pouca ou inexistente
Ritmo de desenvolvimento	Ritmo de engajamento dos atores em atividades de inovação estimulado pela convergência de interesses e expectativas associadas às oportunidades abertas por uma área tecnológica emergente.	Relativamente lento	Acelerado	Estagnado ou em declínio
Coerência	Força da 'identidade' da tecnologia ao longo do tempo.	Incoerente	Relativamente coerente	Muito coerente
Impacto proeminente	Amplitude dos efeitos da TE nos domínios específicos em que se aplica, ou no sistema socioeconômico.	Limitado	Considerável	Alto
Incerteza e ambiguidade	Nível de incerteza sobre os possíveis resultados e usos da TE, bem como o grau de ambiguidade dos significados que os diferentes grupos sociais associam à tecnologia em questão.	Alto	Médio	Baixo

Fonte: Elaboração própria a partir de ROTOLO; HICKS; MARTIN, 2015.

Nessa segunda onda de estudos, os estudos recentes têm tido foco no processo de emergência, amadurecimento e declínio dos STI que, não necessariamente desaparecem, mas podem se transformar (MARKARD, 2020). Além disso, a perspectiva das funções do STI é introduzida com o objetivo de analisar os processos dinâmicos no interior dos sistemas tecnológicos que influenciam a geração, desenvolvimento e difusão de uma nova tecnologia (BERGEK et al., 2008; HEKKERT et al., 2007). A abordagem das funções do STI trata de elucidar o processo de formação dos elementos estruturais de sistemas tecnológicos emergentes, a saber, atores, redes e instituições em um dado contexto, bem como compreender os eventos determinantes das falhas ou sucesso na introdução e difusão de uma nova tecnologia e os mecanismos de interação entre essas funções que podem acelerar ou debilitar o processo de inovação (BERGEK et al., 2015; NEGRO; HEKKERT; SMITS, 2007; SUURS, 2009).

A abordagem das funções dos STI tem sido largamente utilizada em estudos que tematizam a emergência de novos sistemas energéticos de baixa-emissão de CO₂, particularmente, energias renováveis (JACOBSSON; BERGEK, 2004, 2011). Este artigo explora o caso do SPS na IPGN a fim de contribuir para o preenchimento de uma lacuna identificada na abordagem das funções do STI, a saber, a investigação do processo de emergência de uma TE em um setor incumbente, tal qual a IPGN. No escopo deste artigo, são consideradas as seguintes funções do STI: F1 – atividade empreendedora experimental; F2 – produção de novos conhecimentos; F3 – difusão dos conhecimentos; F4 – orientação da busca; F5 – formação de mercados; F6 – mobilização de recursos e F7 – criação de legitimidade/superação da resistência à mudança tecnológica.

3. Processamento submarino de petróleo e gás natural: Uma TE na IPGN?

Até a década de 1960, as atividades *offshore* baseavam-se no princípio da completação seca, dispondo os sistemas de controle e regulação da produção sobre os deques das plataformas. Contudo, os desafios tecnológicos associados ao escalonamento da complexidade dos projetos de E&P em águas cada vez mais profundas e distantes da costa abriram uma janela de oportunidades aproveitada por companhias de petróleo e suas fornecedoras referente ao desenvolvimento de sistemas de produção submersíveis. Através da marinização de sistemas de produção de petróleo e gás natural, dá-se início a uma transição tecnológica na IPGN da completação seca em direção à completação 'molhada', ao disporem tecnologias adequadas às condições submarinas no leito marinho (BARLOW, 2000; HAMMET; LUKE, 1986).

A história da IES é periodizada em três ciclos de desenvolvimento (RUAS, 2012). No primeiro ciclo (1960-1970), ainda que houvessem diversos protótipos de equipamentos submarinos em desenvolvimento, a carência de padronização tecnológica implicou na baixa procura por essas tecnologias nos projetos *offshore* da IPGN. Ao longo do segundo ciclo (1980-1990), se observou, por um lado, o estabelecimento de desenhos dominantes de algumas tecnologias submarinas, bem como de seus

parâmetros operacionais e, por outro lado, a necessidade de novas tecnologias que dispensam a necessidade de mergulhadores para sua instalação em águas profundas. O terceiro ciclo teve início nos anos 1990 e se estende até o presente momento. Nesse período, o amadurecimento das trajetórias tecnológicas de alguns equipamentos submarinos, particularmente, as Árvores de Natal Molhadas (ANM) e *manifolds* corroboraram o avanço da indústria nas águas ultra-profundas. Além disso, a consolidação da E&P *offshore* em águas profundas motivou a IPGN a direcionar esforços para desenvolver uma nova geração de tecnologias submarinas de produção desde a década de 1990.

Na esteira da expansão da IPGN em águas ultra-profundas, o SPS emergiu como uma solução tecnológica para os seguintes gargalos das atividades de E&P *offshore*: viabilização econômica da produção de um poço submarino e fornecimento de energia necessária à elevação artificial dos fluidos produzidos até as unidades de processamento (BAI; BAI, 2018). As tecnologias associadas ao SPS lidam com a separação de fluidos extraídos dos reservatórios de hidrocarbonetos; impedir a cristalização de elementos contaminantes nas linhas de escoamento; tratar e injetar água e gases em poços injetores, além de modificar as condições físico-químicas no interior dos poços produtores, fornecendo energia necessária para a elevação artificial dos hidrocarbonetos, através de sistemas de bombeio ou compressores submarino (BAI; BAI, 2018; CARPENTER, 2017; RUUD et al., 2015). Essas tecnologias estão diretamente relacionadas ao processo de eletrificação dos sistemas de produção de petróleo e gás natural (LEGEAY; HAZEL; PEREGRYM, 2013). O SPS é composto pelos seguintes subsistemas: estimulação submarina (ES); compressão submarina de gás (CSG); separação submarina (SS); tratamento e (re)injeção submarina de água (TRI) e linhas de fluxo eletricamente aquecidas, ou 'aquecimento ativo' (AA). A Figura 1 apresenta uma representação esquemática de uma 'usina submarina' que integra o conjunto de subsistemas relacionados ao SPS, enquanto o Quadro 2 descreve as principais características de cada subsistema considerado neste artigo.

Ainda que apresentem características e funções distintas, esses subsistemas apresentam graus de novidade radical em relação aos sistemas incumbentes de produção de óleo e gás; geram expectativas nos atores da IPGN em relação ao seu impacto dentro e fora da indústria; são demonstrados em um número crescente de projetos industriais e tem assumido maior coerência em termos de desenho tecnológico, mesmo que seu grau de performance sinalize incertezas acerca do futuro da tecnologia. Sendo assim, é possível questionar em que medida o SPS pode ser considerado um sistema tecnológico constituído por TE no momento em que o segmento de E&P *offshore* submete, concomitantemente, os sistemas de produção de petróleo e gás natural aos processos de marinização e eletrificação. A fim de identificar a dinâmica de interação dos atores e instituições nas redes associadas ao desenvolvimento do SPS no atual ciclo de desenvolvimento da IES, realizar-se-á uma análise das funções do STI em processamento submarino de petróleo e gás natural na seção 5. Os procedimentos metodológicos que sustentam a análise das funções estão descritos na próxima seção.

Figura 1 - Subsistemas de processamento submarino integrados no conceito de 'usina submarina'



Fonte: Adaptado de TECHNIPFMC, 2019.

Nota: A – Separador; B – Bomba; C – Compressor; D – Módulo de controle do sistema; E – Válvula de controle; E – Indicador de sinais ultrassônicos; F – Transformador de alta tensão; G – Tanque de separação; H – Bomba injetora; I – Resfriador.

Quadro 2 - Caracterização dos subsistemas de processamento submarino de petróleo e gás natural

Conceito tecnológico	Artefato tecnológico	Características principais
ES	Bombas elétricas	Aprimoramento e aceleração da produção ao diminuir a pressão nas cabeças de poços; Aumento do volume de recuperação total de um poço ao diminuir a pressão de abandono; Viabilização da produção em reservatórios de baixa pressão; Redução dos efeitos hidrostáticos em águas profundas; Aprimoramento do transporte de fluidos produzidos.
CSG	Compressores de gás	Aumento do nível de recuperação e viabilização da produção de extensos campos satélites interconectados (<i>subsea tiebacks</i>).
SS	Separadores (multi)fásicos	Separação dos fluxos de líquidos e gás, removendo água e contaminantes dos fluidos produzidos; Aumento da recuperação do poço e do campo produtor como um todo; Diminuição da razão pressão/energia de estimulação nos poços.
TRI	Bombas injetoras	Injeção de resíduos em poços injetores com consequente diminuição das emissões de poluentes associadas às atividades de E&P.
AA	Cabos de força acoplados a seções das linhas de escoamento	Tratamento elétrico das linhas de fluxo; Eliminação de contaminantes incrustados nos dutos; Redução da possibilidade de entupimento nas linhas de escoamento, assegurando a continuidade do fluxo de produção.

Fonte: Elaboração própria a partir de BAI; BAI, 2018.

4. Metodologia

Para superar os desafios de operacionalização do conceito de TE e do processo de emergência tecnológica, foram combinados diferentes métodos quantitativos e qualitativos na análise empírica. Esta, por sua vez, se apoiou na coleta e tratamento de dados referentes a projetos demonstrativos, publicações científicas, patentes de invenção e redes.

Primeiro, projetos demonstrativos em processamento submarino na IPGN foram explorados a fim de sistematizar informações técnicas, bem como identificar os atores da indústria envolvidos nas atividades de experimentação e promoção dos SPS através de técnicas de análise de conteúdo. Esses dados foram extraídos de dois *surveys* organizados pelo periódico *Offshore Magazine*. O primeiro reuniu informações das tecnologias de CSG; ES; TRI e SS. O segundo tematiza projetos de AA. Ao excluir projetos com informações insuficientes, a amostra final analisada se refere a 91 projetos demonstrativos em SPS implementados na IPGN entre 1990 e 2019.

As publicações científicas (artigos científicos e trabalhos apresentados em congressos) foram coletadas na base de dados *Scopus*. A coleta de patentes concedidas foi realizada na base de dados *Derwent Innovation Index*. O levantamento de dados se apoiou em técnicas de combinação de palavras-chave e códigos de IPCs, no caso das patentes. Após o tratamento dos dados em um *software* de mineração de dados, nossa amostra final corresponde a 1.624 publicações e 1.872 patentes de invenção no período 1990-2019. A partir dos dados de publicações científicas e patentes foram gerados indicadores bibliométricos e patentométricos. Essas abordagens metodológicas, majoritariamente quantitativas, revelam importantes aspectos da dinâmica dos campos científicos e tecnológicos (HICKS et al., 2015). Ainda que uma parcela considerável do conhecimento seja tácita e não-codificável, quando a bibliometria e a patentometria são combinadas com técnicas qualitativas de análise, é possível compreender aspectos significativos da dinâmica de produção de novos conhecimentos e a orientação da pesquisa e da inovação em áreas científicas e tecnológicas emergentes (MOED; GLÄNZEL; SCHMOCH, 2005).

Complementar às análises apresentadas acima, redes caracterizadas por interações diádicas⁵ foram estruturadas a fim de visualizar as relações existentes entre os atores que participam das atividades de inovação em SPS, bem como as possíveis mudanças de morfologia e configuração dessas redes ao longo do tempo. As redes são formadas pelas interações de companhias de petróleo, empresas fornecedoras e organizações de pesquisa (universidades, institutos de pesquisa, laboratórios públicos) que participaram da execução de projetos demonstrativos, compartilham a coautoria de um artigo ou a titularidade⁶ de uma patente associada a SPS no período analisado. O posicionamento dos atores nas redes indica seu grau de importância para a transmissão de conhecimento entre os demais atores. Sendo assim, no presente artigo, são consideradas três categorias de redes, a saber, (i) redes de clientes-fornecedores de tecnologias de

⁵ Mínima configuração possível de relacionamento em um grupo social, caracterizado pela interação entre duas partes de um conjunto.

⁶ A opção pela cotitularidade das patentes, ao invés da coinvenção se deveu pelo escopo do trabalho, seja pela análise de um STI global, seja pelo espaço temporal de trinta anos, o que dificulta a identificação da afiliação institucional dos inventores à época da concessão das patentes de invenção.

processamento submarino, a partir dos dados de projetos demonstrativos; (ii) redes de colaboração de pesquisa, a partir das publicações em coautoria e, finalmente, (iii) redes de cooperação tecnológica baseadas nos dados de patentes em cotitularidade.

Por fim, realizou-se uma análise das funções do STI sobre os indicadores elaborados durante a análise empírica para investigar os principais processos na evolução do STI em processamento de petróleo e gás natural entre 1990 e 2019. Desse modo, foi possível interpretar o desempenho de cada função na dinâmica do sistema tecnológico. Por fim, elabora-se uma interpretação acerca da ressonância dos principais resultados da análise das funções do STI no processo de emergência do SPS, qualificando seus subsistemas em referência aos atributos de TE.

5. Análise das funções do STI em processamento submarino de petróleo e gás natural

O período entre 1990 e 2019 viabilizou a emergência de uma nova geração de sistemas submarinos de produção na IPGN. O SPS tem sido apoiado por narrativas de ruptura do paradigma tecnológico da E&P *offshore* por parte de atores relevantes na indústria. Entretanto, essa perspectiva de ruptura pode encontrar resistência em um setor caracterizado por uma trajetória de continuidade, afetando os rumos de sua trajetória de desenvolvimento. Dessa forma, por assumir características de TE, o SPS é influenciado por mudanças no STI. A seguinte análise das funções do STI em processamento submarino de petróleo e gás natural permite tomar nota das principais mudanças que afetam o processo de emergência de uma TE. Esses efeitos são sentidos de maneira mais ou menos profunda de acordo com o desempenho de cada função. Dessa maneira, as funções serão analisadas separadamente nesta seção. Na seção **Erro! Fonte de referência não encontrada.** encontra-se uma interpretação geral dos efeitos das funções do STI no processo de emergência dos SPS.

5.1. Função 1 – Atividade empreendedora experimental

Entre 1990 e 2019, foram implementados noventa e um projetos demonstrativos em SPS (ver Tabela 1) na IPGN *offshore* com o objetivo de acelerar a curva de aprendizado tecnológico, bem como aumentar a escala dos projetos em nível industrial. Ao mesmo tempo, os projetos demonstrativos buscaram aumentar o apoio de potenciais usuários ao desenvolvimento e adoção dessas tecnologias em seu portfólio tecnológico. Dá-se destaque a dois efeitos da atividade experimental na viabilização dessas TE. Em primeiro lugar, os subsistemas têm logrado conformar trajetórias de desenvolvimento mais definidas, sendo possível identificar uma ‘identidade’ da tecnologia que influencia o direcionamento de seu processo de inovação. Em segundo lugar, um aumento dos níveis de capacidade e segurança operacional relacionada à demonstração do processamento submarino em águas profundas e ultra-profundas.

Tabela 1 - Projetos demonstrativos implementados em SPS na IPGN (1990-2019)

Período	Nº de projetos
1990-1999	8
2000-2009	33
2010-2019	50

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de OFFSHORE MAGAZINE; INTECSEA, 2019a, 2019b.

Em relação ao primeiro efeito, os subsistemas de processamento submarino têm apresentado trajetórias de desenvolvimento condicionadas aos efeitos dos critérios de seleção do meio ambiente e das características particulares dos nichos em estão inseridos. Ainda que as trajetórias de CSG, ES, TRI, SS e AA não sejam concorrentes entre si, o processo de seleção de tecnologias para projetos *offshore* implica em diversificação dos desenhos tecnológicos. Por exemplo, no caso da ES, em função das características dos nichos em que são testadas, os distintos modelos de bombas submarinas competem entre si para firmar-se enquanto sistema de bombeio dominante para a realização da ES.

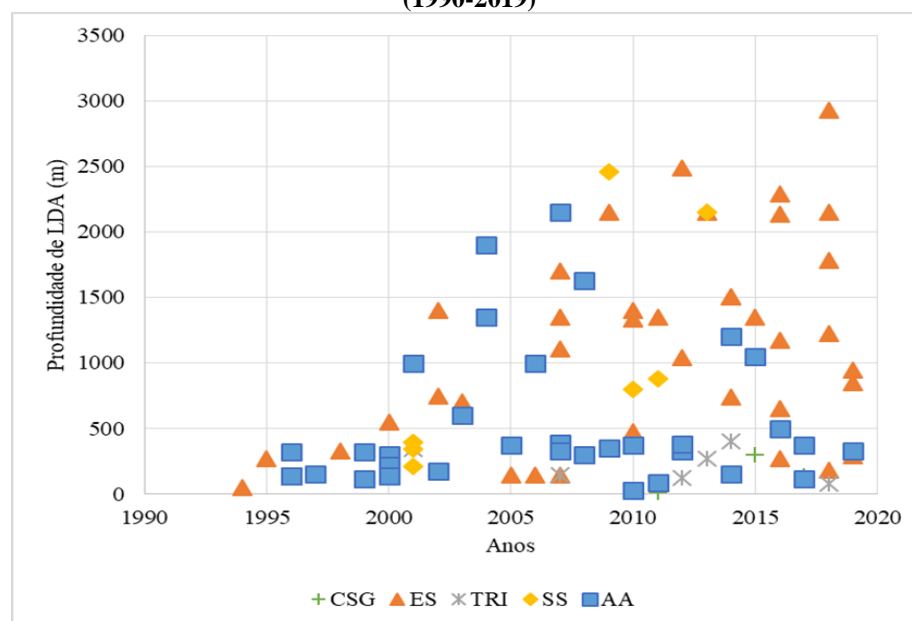
Por sua vez, o segundo efeito da atividade experimental implicou em aprendizado tecnológico decorrente do acúmulo de competências que viabilizou a aplicação do SPS no *offshore* profundo. A Figura 2 sugere que, a partir da década de 2000, projetos demonstrativos relacionados ao SPS passaram a ser implementados em águas profundas. Além disso, é possível inferir que a ES apresenta uma trajetória de desenvolvimento mais amadurecida em relação às demais, considerando sua difusão em projetos de E&P em águas profundas e, atualmente, ultra-profundas. Isso se explica, por um lado, pela *expertise* dos atores em sistemas de bombeio submarino, desenvolvidos desde a década de 1980, por outro, pelo fato de que as maiores expectativas da IPGN em relação à E&P de novos recursos energéticos estão nas águas ultra-profundas e outras geologias complexas que necessitam de tecnologias que deem apoio ao fornecimento de energia para essas operações (ZHANG et al., 2019). Por sua vez, os projetos demonstrativos em CSG e TRI estão circunscritos a regiões de águas rasas, o que sugere não apenas limitações técnicas e

operacionais, mas também aspectos de tecnologias experimentais e prototípicas. Em suma, esses indicadores sugerem que os projetos demonstrativos em SPS têm logrado aumentar os níveis de coerência dessas TE, ampliando suas capacidades tecnológicas, bem como sua escala na indústria.

Ao longo do período analisado, 44 atores diferentes implementaram projetos demonstrativos em SPS na IPGN entre 1990 e 2019. De acordo com a Tabela 2, grandes companhias de petróleo e empresas fornecedoras de equipamentos e serviços são as organizações mais engajadas na demonstração do processamento submarino. Ainda que a Equinor seja o ator que mais implementou projetos demonstrativos no período analisado, deve-se destacar que a Petrobrás, companhia brasileira de petróleo, foi aquela que mais experimentou essas tecnologias na última década. Isso se explica pelo sucesso do processo de emparelhamento – *catching-up* – da Petrobrás através de uma estratégia de participação nas redes internacionais de conhecimento e P&D colaborativa relacionados a programas tecnológicos voltados à identificação e desenvolvimento endógeno de tecnologias de E&P *offshore* nas décadas de 1980 e 1990 (FURTADO; FREITAS, 2000), bem como pelo impulso da descoberta do pré-sal brasileiro à demanda de tecnologias adequadas à viabilização da exploração comercial desses novos recursos energéticos na segunda metade da década de 2000.

A atividade empreendedora experimental se concentrou nas companhias de petróleo com forte atuação na E&P *offshore* e empresas fornecedoras historicamente relevantes para o desenvolvimento de tecnologias para o setor (ver Tabela 2). Estas lograram diversificar as tecnologias de processamento submarino, inaugurando trajetórias de desenvolvimento mais adequadas às configurações ambientais e geológicas das provinciais exploratórias em que são testadas. Sendo assim, essa função indica que a indústria tem apoiado o desenvolvimento e a difusão dessas TE com vistas a aprimorar a E&P no *offshore* profundo, ao passo que buscam dinamizar as atividades submarinas, marinizando atividades que, até pouco tempo, eram realizadas exclusivamente nos decks das unidades de produção como a separação e a injeção.

Figura 2 - Evolução das capacidades de operação em profundidade de LDA do SPS por conceito tecnológico (1990-2019)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de OFFSHORE MAGAZINE; INTECSEA, 2019a, 2019b.

Tabela 2 – Top 5 organizações com mais projetos demonstrativos implementados em SPS (1990-2019)

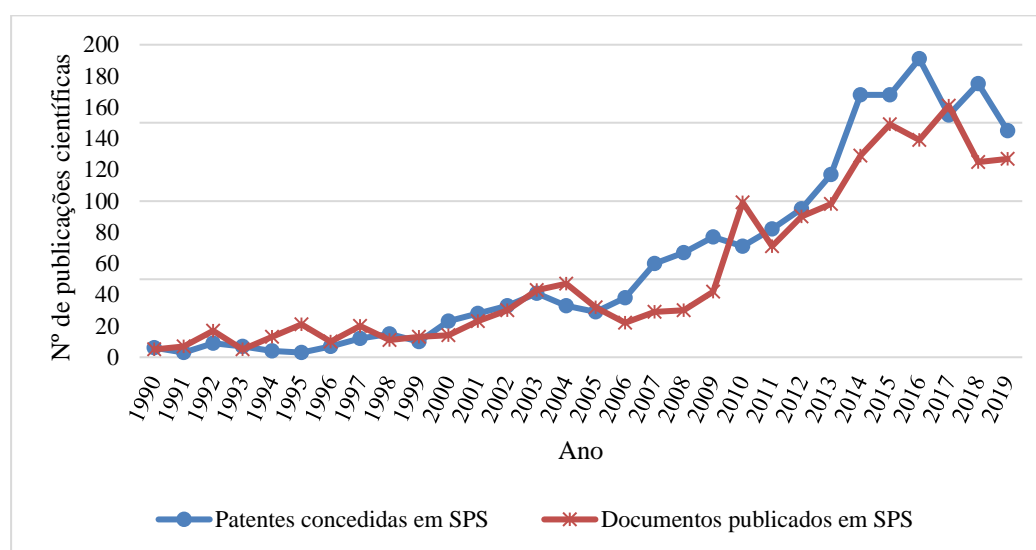
Companhia de petróleo	País-sede	Nº de projetos	Empresa fornecedora	País-sede	Nº de projetos
Equinor	Noruega	20	TechnipFMC	Reino Unido/Estados Unidos/França	32
Petrobrás	Brasil	13	Onesubsea	Estados Unidos	30
Shell	Países Baixos/Reino Unido	13	Subsea 7	Reino Unido	16
Total	França	6	Nexans	França	13
Chevron	Estados Unidos	4	Aker	Noruega	11

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de OFFSHORE MAGAZINE; INTECSEA, 2019a, 2019b.

5.2. Função 2 – Produção de novos conhecimentos

O ritmo de produção de novos conhecimentos científicos (publicações) e tecnológicos (patentes) em SPS tem se acelerado ao longo do período analisado (ver Gráfico 1), indicando que o processamento submarino é uma área tecnológica emergente na IPGN. A criação de novos conhecimentos pode ser compreendida como um indicador de resultado dos esforços de P&D e da amplitude da base de conhecimentos dos atores envolvidos no desenvolvimento dessas TE. Considerando o valor estratégico dos conhecimentos para a obtenção de vantagens competitivas, áreas tecnológicas emergentes abrem janelas de oportunidades para o desenvolvimento de capacidades de acumulação e apropriação de novos conhecimentos com potencial transformador das estruturas dos padrões tecnológicos existentes. Sendo assim, não surpreende o fato da dinâmica de produção de novos conhecimentos em SPS seja, majoritariamente, conduzida pela pesquisa corporativa, ao invés de acadêmica. Essa função, como ficará evidente ao final desta subseção, dá aporte para reflexões acerca da natureza do conhecimento desenvolvido por companhias de petróleo e empresas fornecedoras.

Gráfico 1 - Evolução das publicações científicas em SPS (1990-2019)



Fonte: Elaborado a partir dos dados de SCOPUS, 2019.

5.2.1. Conhecimentos científicos

A pesquisa corporativa é a principal indutora de novos conhecimentos em SPS (ver Tabela 3). As companhias de petróleo aparecem como as principais desenvolvedoras de novos conhecimentos científicos. A Petrobrás se destaca entre aquelas que desenvolvem conhecimentos em SPS. A liderança da Petrobrás na produção de conhecimentos científicos em uma TE e estratégica na fronteira tecnológica da produção submarina não só reflete seu papel como desenvolvedora de infraestruturas científicas e tecnológicas, mas também, a amplitude de sua base de conhecimento no que se refere à E&P *offshore*. Outras quatro companhias de petróleo com importante atuação *offshore* figuram entre os atores que mais publicam sobre SPS, a saber, Equinor (88 publicações); Shell (83); Total (61) e BP (48). Entre as empresas fornecedoras que mais criaram conhecimentos científicos, ranqueamos a TechnipFMC (101 publicações); Schlumberger (92); Aker (52) e Saipem (31). A única universidade que aparece nesse *ranking* foi a Norwegian Science & Technology University, contabilizando 72 publicações em processamento submarino, entre 1990 e 2019.

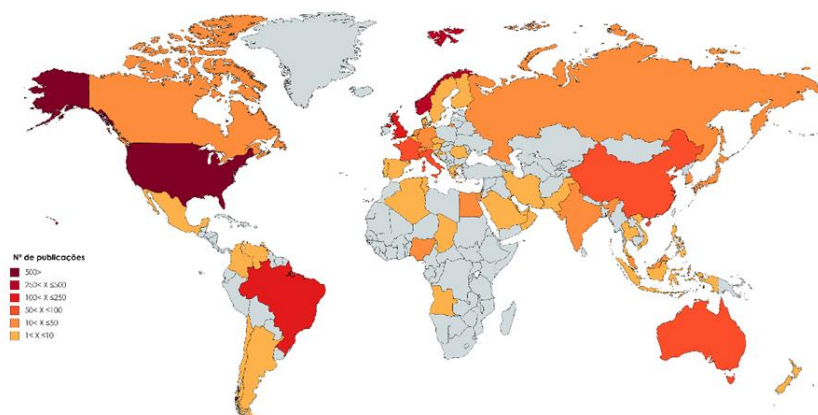
Tabela 3 - Top 10 organizações com mais documentos publicados em SPS (1990-2019)

#	Organização	País-sede	Nº de documentos
1	Petrobrás	Brasil	102
2	TechnipFMC	Reino Unido/Estados Unidos/França	101
3	Schlumberger	França/Estados Unidos/Reino Unido	92
4	Equinor	Noruega	88
5	Shell	Países Baixos/Reino Unido	83
6	Norwegian S&T U.	Noruega	72
7	Total	França	61
8	Aker	Noruega	52
9	BP	Reino Unido	48
10	Saipem	Itália	31

Fonte: Elaborado a partir dos dados de SCOPUS, 2019.

A geografia da produção desses conhecimentos (ver Figura 3) sugere que as atividades de pesquisa científica estão concentradas nas regiões que possuem fortes setores petrolíferos, especializados na E&P *offshore*. Além disso, grande parte dos países que publicaram sobre SPS possuem grandes reservas de petróleo e gás natural, evidenciando o valor estratégico dessas tecnologias para o desenvolvimento das respectivas indústrias nacionais de óleo e gás. Os países que mais produziram conhecimentos científicos em SPS são os Estados Unidos (624 publicações); Noruega (285) e Reino Unido (216). O Brasil é o único país do Sul Global com relevância na produção de novos conhecimentos em processamento submarino (188).

Figura 3 - Geografia da produção de conhecimentos científicos em SPS (1990-2019)



Fonte: Elaborado a partir dos dados de SCOPUS, 2019.

Nota: Leia-se na legenda da figura em ordem decrescente: N° de publicações: 500>; 250<X≤500; 100<X≤250; 50<X≤100; 10<X≤50; 1<X≤10.

5.2.2. Conhecimentos tecnológicos

A dinâmica de criação de conhecimentos tecnológicos difere um pouco daquela observada na subseção anterior. Ainda que a pesquisa tecnológica seja levada a cabo por atores da IPGN, as empresas fornecedoras são as organizações com mais títulos de patentes concedidas em SPS (ver Tabela 4).

Tabela 4 - Top 10 organizações com mais títulos de patentes em SPS concedidas (1990-2019)

#	Organizações	País-sede	N° de patentes
1	Baker Hughes	Estados Unidos	127
2	Schlumberger	França/Estados Unidos/Reino Unido	99
3	Petrochina	China	66
4	General Electric	Estados Unidos	62
5	CNOOC	China	43
6	Tsurumi Seisakusho	Japão	34
7	Sinopec	China	31
8	Summit ESP	Estados Unidos	29
9	Halliburton	Estados Unidos	26
10	Vetco Gray	Reino Unido	21

Fonte: Elaborado a partir dos dados de DERWENT INNOVATION INDEX, 2019.

As duas maiores empresas fornecedoras do setor são as que detêm o maior número de títulos de patentes – Baker Hughes (127) e Schlumberger (99). Outros importantes fornecedores de equipamentos e serviços à IPGN também figuram nesse *ranking*, a saber, GE; Halliburton; Vetco Gray e empresas especializadas na fabricação de bombas/compressores e componentes elétricos – Tsurumi Seisakusho e a Summit ESP. As únicas companhias de petróleo nesse *ranking* são as chinesas Petrochina (66 patentes); CNOOC (43) e Sinopec (31). A TechnipFMC, uma das empresas que mais publicaram sobre SPS, não aparece como uma das organizações que mais detêm titularidade de patentes.

Assim como a produção de conhecimentos científicos (ver seção **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), a geografia da produção de conhecimentos tecnológicos se concentra em países do Norte Global, especialmente, naqueles que sediam grandes empresas fornecedoras de equipamentos e serviços para a IPGN, como os Estados Unidos e o Reino Unido. A relevância dos atores chineses nesse *ranking* sugere a formação de uma estratégia tecnológica nacional que busca desenvolver capacidades endógenas de inovação. Essa estratégia encontra paralelo nos processos de *catching-up* de companhias do petróleo

que foram alçadas a posições expoentes na fronteira tecnológica do setor do petróleo e gás natural *offshore*, tais quais, a Equinor e a Petrobrás.

A produção de novos conhecimentos está concentrada nos atores que tem mobilizado recursos, ao longo de anos, para financiar e executar atividades de inovação, assumindo também os elevados riscos da inovação. Às organizações de pesquisa, tais quais, as universidades, cabe um papel complementar no STI em SPS.

De acordo com a análise dessa função, as companhias de petróleo estão orientadas à produção de conhecimentos científicos, enquanto as empresas fornecedoras, conhecimentos tecnológicos. Categorizamos os conhecimentos produzidos entre aqueles (i) comercialmente não-apropriáveis e (ii) comercialmente apropriáveis. Essa primeira categoria representa os conhecimentos identificados nas publicações científicas que relatam, revisam e exploram aplicações e usos de uma tecnologia que dão aportes científicos e técnicos à inovação. Sendo assim, esse conhecimento derivado de pesquisa corporativa, majoritariamente levado a cabo pela iniciativa privada, não é comercialmente apropriável porque socializa parte das informações estratégicas, embora seja fundamental para o avanço da tecnologia. A segunda categoria, por sua vez, se refere aos conhecimentos protegidos pela propriedade intelectual, como recompensa dos esforços de inovação.

Essas reflexões encontram sustentação nos efeitos das mudanças na divisão do trabalho da IPGN ocorridas na década de 1980, no que diz respeito às atividades de inovação. Ao desonerarem parte significativa das atividades de P&D, as companhias de petróleo – antigas proprietárias das tecnologias – permitiram às suas fornecedoras deter a parte mais apropriável das novas tecnologias desenvolvidas para a IPGN (RIBEIRO et al., 2020). Entretanto, as companhias de petróleo produzem uma parcela importante de novos conhecimentos, sobretudo, ao socializar os resultados da experimentação de novas tecnologias como demonstra o caso do SPS na IPGN.

5.3. Função 3 – Difusão dos conhecimentos

Os eventos do setor do petróleo são os espaços privilegiados de difusão dos conhecimentos entre membros das organizações de pesquisa e da indústria. Nesses eventos são divulgados informações e resultados sobre projetos industriais; premiando, inclusive, as realizações dos atores que mais contribuíram com o avanço tecnológico da indústria. Além disso, são debatidos os desafios do setor petrolífero, bem como as suas estratégias de solução de problemas e desenvolvimento em referência às atividades da IPGN. Os eventos corroboram a formação de redes informais, assim como a coalização de interesses em torno de uma determinada tecnologia. A Tabela 5 apresenta os eventos que mais discutiram SPS, em que a *Offshore Technology Conference* (OTC), principal evento voltado às atividades da indústria *offshore*, também é a principal plataforma de difusão dos conhecimentos produzidos.

Tabela 5 - Top 5 eventos da IPGN que mais publicaram trabalhos sobre SPS (1990-2019)

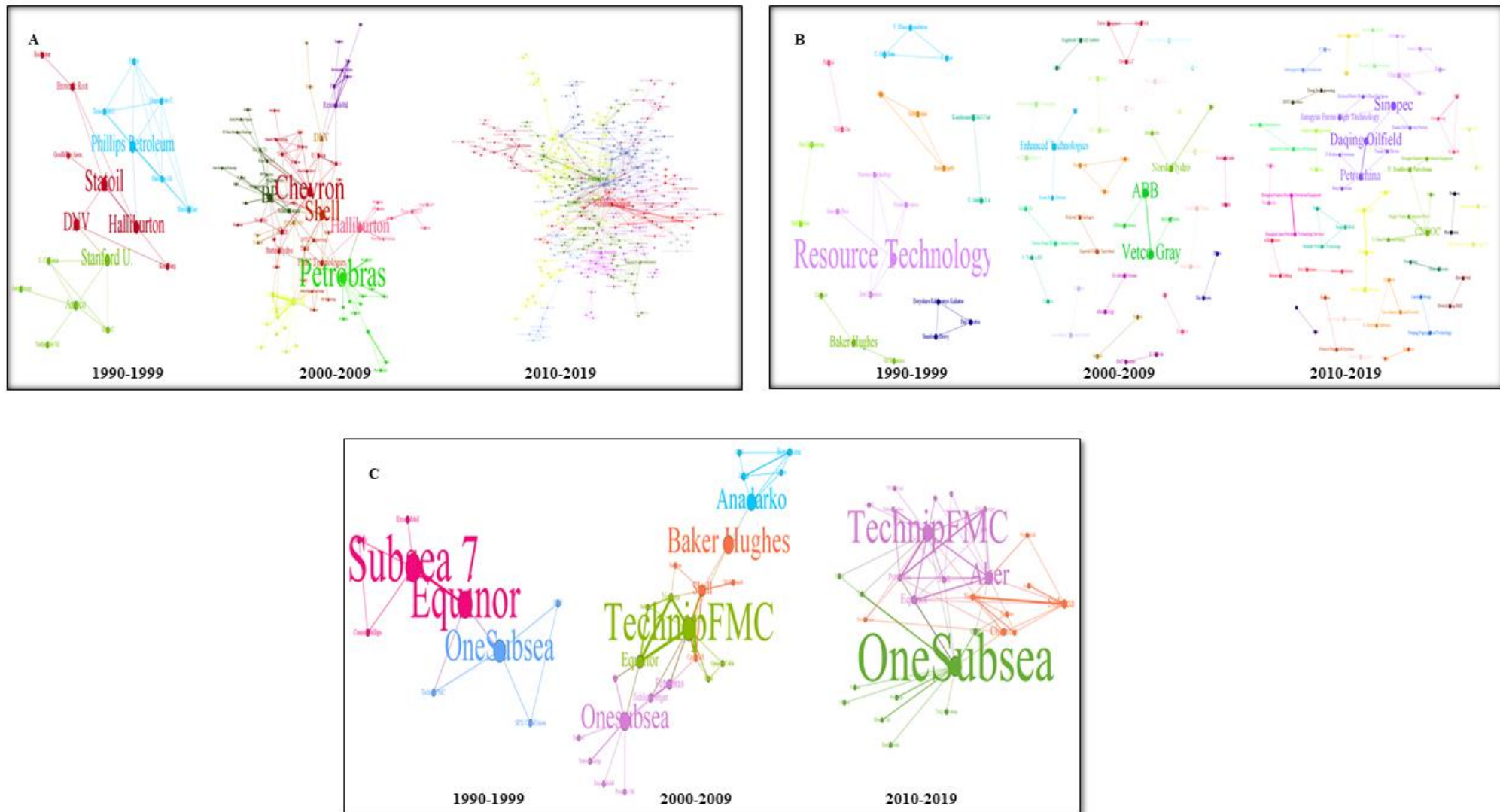
Evento	Nº de documentos
OTC	375
International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering	113
International Offshore and Polar Engineering Conference	61
Offshore Europe Conference	55
SPE Annual Technical Conference and Exhibition	55

Fonte: Elaborado a partir dos dados de SCOPUS, 2019.

Em decorrência da dimensão da complexidade, custos e barreiras à inovação associados à emergência de uma nova tecnologia, são necessárias interações, em diversos níveis e entre atores de diferentes naturezas, para o avanço da base de conhecimentos. Essas interações, por sua vez, estruturam redes de colaboração/cooperação. No caso dos SPS, a função demonstra que os tipos de interação mais frequentes são aqueles entre usuários e fornecedores dessas tecnologias, tanto na dimensão da pesquisa (publicações), quanto desenvolvimento (patentes de invenção) e demonstração (projetos demonstrativos) (ver

Figura 4). As interações do tipo universidade-empresa são menos frequentes. Entretanto, estas são meios pelos quais as companhias de petróleo e empresas fornecedoras acessam novos conhecimentos; realizam transferência tecnológica da comunidade acadêmica para a o setor industrial e identificam soluções tecnológicas potenciais. Conforme explicitado na subseção anterior (ver seção **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), a pesquisa acadêmica é complementar à pesquisa corporativa.

Figura 4 - Estruturas de redes de colaboração científica, cooperação tecnológica e clientes-fornecedores de tecnologias de SPS (1990-2019)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de DERWENT INNOVATION INDEX, 2019; OFFSHORE MAGAZINE; INTECSEA, 2019a, 2019b; SCOPUS, 2019.

Nota: Box A: Redes de colaboração científica (publicações científicas em coautoria); Box B: Redes de cooperação tecnológica (patentes em cotitularidade); Box C: Redes de clientes-fornecedores de tecnologias em projetos demonstrativos.

Considerando que o SPS é uma TE muito recente, as principais atividades de interação se dão na dimensão da pesquisa. A expansão das redes de colaboração científica ao longo do período analisado reforça a ideia de aumento do ritmo de desenvolvimento da tecnologia. Mais além, é possível observar como alguns atores importantes da indústria conseguiram emparelhar em relação a seus concorrentes, através de um processo de *catching-up*. O exemplo mais evidente é o da Petrobrás que começou a participar das redes de colaboração científica na década de 2000 e assumiu, ao fim da década de 2010, uma posição de centralidade na rede. A Schlumberger apresenta uma trajetória semelhante no mesmo período. Na contramão desse fenômeno, a Equinor (antiga, Statoil), ingressou como ator central na rede de colaboração, na década de 1990, mas não está em uma posição de destaque na rede no período recente.

Ao contrário da colaboração científica, a cooperação tecnológica, em nível de propriedade intelectual compartilhada entre os atores é muito pequena. A própria estrutura industrial pode ajudar a explicar esse resultado, considerando que a mesma atua como freio à colaboração no nível da apropriação dos conhecimentos. Tanto é que as únicas estruturas de rede de cotitularidade de patentes se dão entre organizações, em sua maioria, chinesas, o que indica os interesses das companhias de petróleo chinesas em estabelecer uma estratégia de inovação marcadamente colaborativa com fornecedores e universidades locais. Essa estratégia reflete os interesses da China em desenvolver capacidades tecnológicas endógenas, visando identificar e se apropriar dos conhecimentos em TE no setor do petróleo *offshore*.

Outro mecanismo de difusão de conhecimentos está associado ao padrão concorrencial da indústria parapetrolífera, tendo em vista que a dinâmica de fusão e aquisição entre fornecedores, no contexto de consolidação dessa indústria, foi responsável pela difusão dos conhecimentos em SPS entre atores que não necessariamente desenvolviam essas tecnologias, mas que passaram a dedicar-se a atividades de inovação ao fundir-se ou adquirir uma terceira parte.

Por fim, as transformações nas redes estabelecidas entre clientes e fornecedores em projetos demonstrativos de SPS refletem aspectos do processo de transferência de atividades inovativas às fornecedoras da cadeia de óleo e gás, iniciado na década de 1980. À medida que as tecnologias evoluem, as empresas fornecedoras passam a exercer governança sobre a rede; isto é, assumem posições de centralidade na rede para a transmissão de conhecimentos, enquanto as companhias de petróleo tornam-se clientes, assumindo posições periféricas em relação às suas fornecedoras. Além disso, é possível capturar aspectos da dinâmica de concorrência da indústria parapetrolífera na corrida tecnológica pelos sistemas submarinos de produção se analisarmos as mudanças dos atores centrais nas redes nos três períodos analisados. Primeiro, o predomínio da TechnipFMC e da Baker Hughes em relação à Onesubsea (subsidiária da Schlumberger), ao mesmo tempo em que a Subsea 7 e a Equinor perdem relevância na rede, na década de 2000. Na última década, entretanto, a Onesubsea ganha relevância na rede, disputando espaço com a TechnipFMC, ao mesmo tempo em que a Baker Hughes é colocada à margem na rede.

5.4. Função 4 – Orientação da busca

Em episódios anteriores da história da IPGN, tais quais o desenvolvimento de tecnologias adequadas às especificidades das atividades *offshore*, ou a consolidação E&P em águas profundas; ou mais recentemente, os esforços para desenvolver tecnologias de captura, utilização e armazenamento de dióxido de carbono (CCUS), o engajamento de múltiplos atores dessa indústria orienta a direção da trajetória de inovação da tecnologia. No caso do SPS, a função revela uma falha de coordenação dos atores no STI. Por constituírem o grupo que tem maior poder de decisão e investimento sobre as escolhas tecnológicas de seus projetos, os interesses privados das companhias de petróleo têm direcionado os rumos da mudança tecnológica no setor (BARLOW, 2000). Os atores governamentais têm pouco espaço de atuação para coordenar o processo de tomada de decisão estratégica sobre a inovação das companhias de petróleo, se se considera que a orientação tecnológica está concentrada nos interesses privados da iniciativa privada, aonde se origina a maior parte dos atores da IPGN. Consequentemente, a ausência, ou baixa participação de atores do governo na determinação de instrumentos políticos e regulatórios que orientem essa função em uma determinada direção pode gerar riscos à própria segurança operacional e padronização dessas TE. Dessa maneira, inviabilizam-se programas tecnológicos, ou estratégias comuns de desenvolvimento compartilhadas pelos membros da IPGN.

A geração de expectativas positivas entre os atores da IPGN em relação ao SPS é sugerida pelo ritmo mais acelerado de produção de novos conhecimentos nessas tecnologias. É necessário apontar uma mudança qualitativa em relação ao impacto proeminente do processamento submarino entre aqueles que o apoiam. Inicialmente, as expectativas sobre o SPS vislumbravam a descontinuidade do uso de plataformas de produção, sugerindo uma mudança de paradigma tecnológico no setor (ALBUQUERQUE et al., 2013; BAI; BAI, 2018). Apesar da formação de contexto favorável ao SPS nas primeiras décadas do século XXI, os desafios tecnoeconômicos e gargalos tecnológicos relacionados à eletrificação de

sistemas submersíveis questiona em que medida as transformações no STI influenciam a consolidação do SPS como um sistema dominante em médio prazo. A função indica que o SPS está acoplado ao sistema tecnológico dominante. Os efeitos da experimentação e do processo de aprendizado em SPS podem aprimorar seu nível de competitividade, engendrando um processo de transição tecnológica do setor de E&P *offshore* da IPGN em direção aos sistemas submarinos de produção. Essas expectativas encontram apoio na história da conformação da trajetória tecnológica dos sistemas de produção flutuantes (SPF). A partir da década de 1970, plataformas semissubmersíveis começaram a ser adotadas como sistemas de produção antecipada em regiões aonde o emprego de plataformas fixas não era economicamente viável devido à profundidade de LDA. A curva de aprendizado e o aprimoramento dos sistemas de flutuação e ancoragem tornaram possível aumentar a escala dos projetos de E&P baseados em SPF. As atividades *offshore* na Bacia de Campos ilustram o processo de emergência da trajetória tecnológica dos SPF (FURTADO, 1996).

5.5. Função 5 – Formação de mercado

As tecnologias de processamento submarino de petróleo e gás natural são desenvolvidas em diferentes mercados-nicho na IPGN, em diferentes províncias exploratórias ao redor do globo. Esses mercados-nicho são espaços privilegiados que protegem a tecnologia dos mecanismos de seleção do mercado, bem como da competição com sistemas tecnológicos dominantes (SCHOT; GEELS, 2008). A Tabela 6 sugere que os mercados estratégicos para o SPS são aqueles que possuem um segmento de E&P consolidado (Mar do Norte, Golfo do México e litoral brasileiro) e emergente (Golfo da Guiné, costa australiana, Mar da China).

Tabela 6 - Projetos demonstrativos em SPS por província exploratória, em % (1990-2019)

Região	Nº de projetos implementados em cada período			
	1990-1999	2000-2009	2010-2019	1990-2019
Austrália	0	1	2	3
Brasil	0	5	12	17
China	1	0	0	1
Golfo da Guiné	0	4	8	12
Golfo do México	0	6	6	12
Mar Cáspio	0	0	1	1
Mar do Norte	6	15	18	39
Mar Mediterrâneo	1	0	1	2

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de OFFSHORE MAGAZINE; INTECSEA, 2019a, 2019b.

Por sua vez, a Tabela 7 indica quais são os mercados-nicho para cada subsistema de processamento submarino. A região do Mar do Norte, caracterizado por grandes reservas de gás natural e baixas temperaturas tem sido o principal mercado-nicho para as tecnologias de TRI, CSG e AA. Por sua vez, a ES tem sido mais experimentada em mercados-nicho para tecnologias de águas profundas e ultra-profundas como o Brasil, Golfo do México e Golfo da Guiné. Além disso, a ES é o único subsistema com projetos demonstrativos implementados em todas as províncias exploratórias consideradas neste trabalho.

Tabela 7 - Distribuição geográfica dos projetos demonstrativos em SPS por subsistema (1990-2019)

Região	Subsistemas de processamento submarino				
	CSG	ES	TRI	SS	AA
Austrália	0	3	0	0	0
Brasil	0	11	1	3	1
China	0	1	0	0	0
Golfo da Guiné	0	8	0	1	3
Golfo do México	0	8	0	1	4
Mar Cáspio	0	0	0	0	1
Mar do Norte	3	7	4	2	24
Mar Mediterrâneo	0	2	0	0	0

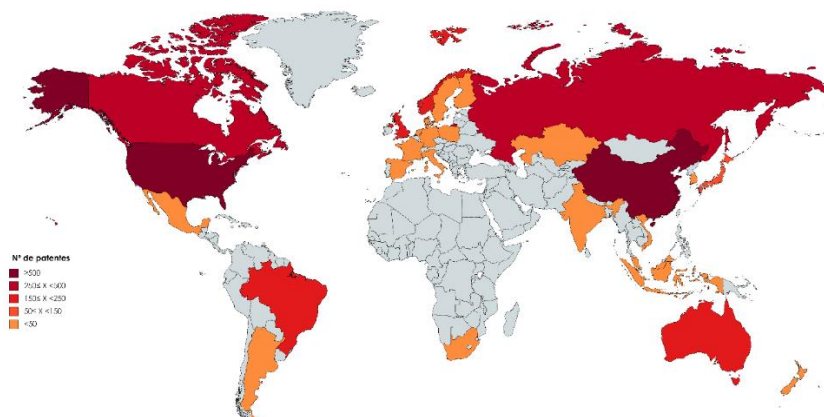
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de OFFSHORE MAGAZINE; INTECSEA, 2019a, 2019b.

A geografia da proteção da propriedade intelectual referente aos conhecimentos tecnológicos em SPS indica quais os mercados de interesse para essas TE. As patentes em SPS são protegidas em 29 países ao redor do globo. De acordo com a Figura 5, a China é o principal espaço de proteção de propriedade intelectual relacionado ao processamento submarino de petróleo e gás natural (816 patentes concedidas). Todavia, a maior parte das patentes chinesas estão protegidas exclusivamente no país.

Essa função evidencia o papel dos mercados-nicho para o desenvolvimento de TE, como ilustra o caso do SPS. Os principais mercados para essas tecnologias são as províncias exploratórias *offshore*

consolidadas, isto é, o Mar do Norte, o litoral brasileiro e o Golfo do México. Particularmente, mercados que demandam tecnologias para suas atividades em águas profundas. Outros mercados emergentes para essas tecnologias são a Austrália, Rússia e Canadá, bem como a China. O caso deste último país indica uma estratégia de proteção de mercado, com foco no desenvolvimento de conhecimentos comercialmente apropriáveis e construção de capacidades endógenas de inovação na fronteira do conhecimento do setor de óleo e gás.

Figura 5 - Geografia da proteção patentária em SPS (1990-2019)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de DERWENT INNOVATION INDEX, 2019.

Nota: Leia-se na legenda em ordem decrescente: N° de patentes - $X > 500$; $250 \leq X \leq 500$; $150 \leq X \leq 250$; $50 \leq X \leq 150$; $50 \leq X$.

5.6. Função 6 – Mobilização de recursos

A competição por recursos é um dos principais desafios para a viabilização de uma TE, considerando as incertezas do processo de inovação. No caso do SPS, o financiamento das atividades inovativas concorre com o desenvolvimento de outras TE no setor, tais quais, os petróleos não-convencionais (gás de xisto e fraturamento hidráulico), bem como as energias renováveis (IEA, 2019). O contexto da IPGN, nos últimos anos tem sido caracterizado pelo imperativo da diminuição dos custos dos projetos *offshore*, pois os preços dessas *commodities* no mercado internacional ficaram muito abaixo daqueles durante o *boom* dos recursos, entre o início dos anos 2000 e a primeira metade da década de 2010.

Dessa maneira, a seleção de TE demonstradas na E&P *offshore* fica a cargo das companhias de petróleo. Estes atores são responsáveis pela tomada de decisão sobre os projetos de E&P *offshore*, selecionando as tecnologias mais adequadas às suas necessidades e interesses; assumindo muito dos riscos, sobretudo, financeiros, de seus projetos, afinal, financiam quase que a totalidade dos projetos de demonstração.

Tabela 8 - Instituições financiadoras de pesquisas acadêmicas em SPS (1990-2019)

Instituições financiadoras	País de origem	N° de documentos
Norwegian S&T University	Noruega	18
Ministry of Trade, Industry and Energy	Coreia do Sul	12
National Natural Science Foundation of China	China	12
The Norwegian Research Council	Noruega	12
Petrobrás	Brasil	7
Australian Research Council	Austrália	6
CNPq	Brasil	6
China University of Petroleum	China	5
CAPES	Brasil	5
Shell	Países Baixos	5

Fonte: Elaborado a partir dos dados de SCOPUS, 2019.

Uma das principais falhas do STI é a ausência de programas tecnológicos específicos de financiamento e promoção de tecnologias em processamento submarino. Os atores públicos são limitados para mobilizar os recursos necessários para a P&D&D em SPS. No caso brasileiro, a cláusula de P&D da Agência Nacional do Petróleo e o fundo setorial do petróleo são políticas voltadas ao fomento à P&D nesse setor que, de maneira geral, impulsionam a capacitação tecnológica e orientam a inovação na indústria brasileira de petróleo e gás natural (FURTADO, 2003). De acordo com a Tabela 8, as agências públicas de fomento à pesquisa são importantes financiadoras de pesquisas acadêmicas associadas ao SPS. A

somatória de documentos que reconhecem explicitamente apoio financeiro às pesquisas em processamento submarino indica que a Noruega é o país que mais dá aportes a essas TE (30 publicações). O Brasil é o segundo país nesse ranking, somados os documentos da Petrobrás, CAPES e CNPq (18 publicações ao total).

5.7. Função 7 – Criação de legitimidade/Superação da resistência à mudança tecnológica

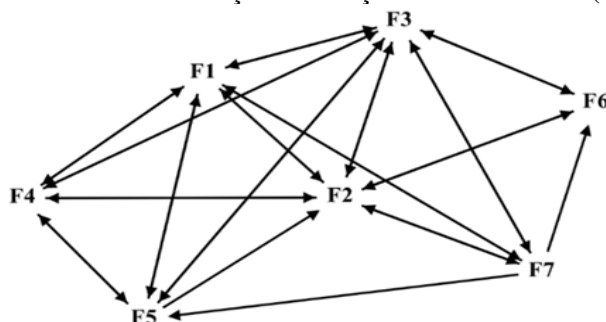
O reconhecimento da contribuição da IPGN para as mudanças climáticas, responsável pelos maiores índices de emissão de GEE, especialmente, dióxido de carbono e gás metano, ao longo do século XX (THE GUARDIAN, 2019) em decorrência da queima de combustíveis fósseis, criou forças de resistência e pressão sobre a continuidade das atividades dessa indústria. Apesar de não existir uma opinião pública explícita a respeito do SPS, as forças contrárias à emergência de novas tecnologias de E&P são daqueles representantes dos grupos que advogam a favor da transição dos sistemas energéticos incumbentes em direção às energias renováveis. Além disso, os riscos associados às tecnologias submarinas podem comprometer futuros projetos *offshore* e, até mesmo, o processo de inovação de TE. A reorientação dos investimentos do setor petrolífero na exploração de xisto nos Estados Unidos (IEA, 2019) na última década é efeito do parcial abandono das atividades de E&P no Golfo do México, após o acidente com a *Deep Horizon*, em 2010. Nesse sentido, o dinamismo tecnológico no setor de E&P *offshore* não assegura uma coalizão de apoios sobre as atividades extrativas da IPGN.

Os principais proponentes do SPS são as companhias de petróleo; empresas fornecedoras e membros da comunidade acadêmica. Os interesses em relação a essas tecnologias são intensos em países ricos em reservas de petróleo e gás natural *offshore*, tais quais, o Brasil, os Estados Unidos, Reino Unido e Noruega. A China também apresenta grandes interesses nessas TE, estabelecendo uma estratégia tecnológica de capacitação de suas indústrias nacionais de petróleo e parapetrolífera. Ainda que seja possível para as companhias de petróleo justificarem o desenvolvimento do SPS ao considerar os efeitos de transbordamento de competências acumuladas pelas atividades de inovação em outras áreas tecnológicas estratégicas para a IPGN, tal qual, a CCUS – sobretudo no contexto de transição energética –, a opinião pública e, até mesmo os bancos de investimentos, tem sinalizado deixar de apoiar novos projetos de E&P de petróleo e gás natural nos próximos anos (MCKINSEY, 2020).

6. O processo de emergência do SPS na IPGN: Uma interpretação à luz da evolução do STI

A análise funcional sugere que nem todas as funções interagem entre si no STI em processamento submarino de petróleo e gás natural (ver Figura 6). Sendo assim, a evolução desse STI global, entre 1990 e 2019, apresenta algumas falhas sistêmicas que afetam o processo de emergência dessas TE.

Figura 6 - Dinâmica de interação das funções do STI em SPS (1990-2019)



Fonte: Elaboração própria, 2021.

A evolução do STI em processamento submarino de petróleo e gás natural tem sido impulsionado por avanços científicos e tecnológicos. O crescimento da produção (F2) e difusão dos conhecimentos (F3) articulam-se à dinâmica da atividade experimental (F1), promovendo um impulso para o desenvolvimento dessas TE entre 1990 e 2019. A F1 tem sido positiva para os testes das tecnologias em condições reais de operação, socialização dos resultados e experiências entre os atores da IPGN em redes formais e informais de inovação. Apesar de dinâmica, a F1 se apoiou sobre companhias de petróleo e empresas fornecedoras já estabelecidas, não havendo muitas oportunidades abertas a novos entrantes.

A formação de mercado (F5) não tem sido pautada por políticas públicas voltadas à criação de espaços de proteção e demonstração de novas tecnologias, mas sim, pela abertura de nichos por parte dos membros da própria IPGN. Consequentemente, a ausência de programas tecnológicos e políticas públicas repercute diretamente na orientação da busca (F4). Além disso, como principais financiadoras dos projetos

de demonstração em SPS (F6), as estratégias das companhias de petróleo acabam determinando as direções das trajetórias de desenvolvimento. A compreensão de que o ritmo de desenvolvimento das tecnologias de ES está diretamente associado aos interesses da IPGN em explorar regiões em águas profundas ajuda a justificar o argumento acima. Dessa maneira, a dependência da F4 em relação aos interesses de um grupo específico de atores pode tornar o sistema de inovação frouxo. Em resumo, a F4 desempenha uma performance fraca no STI porque é positiva para a geração de expectativas em relação à emergência das tecnologias de SPS, especialmente a ES. Todavia, as trajetórias tecnológicas estão limitadas aos interesses da IPGN que tem repercutido na diminuição dos níveis de novidade radical do SPS, ao encará-lo como um sistema tecnológico complementar aos sistemas tecnológicos hegemônicos na E&P *offshore*.

Desde a década de 1990, as atividades da IPGN são duramente criticadas pelo reconhecimento de seus impactos no meio ambiente, sobretudo, nas mudanças do clima. Mesmo que não haja uma opinião pública formada a respeito dos SPS, a expansão da E&P *offshore* carece de legitimidade (F7), sobretudo, após o acidente da plataforma *Deep Horizon* que culminou no episódico derramamento de óleo no Golfo do México, em 2010. Apesar do contexto desfavorável ao regime dos combustíveis fósseis, os Estados continuam a direcionar recursos para a capacitação tecnológica de seus setores nacionais de petróleo, mesmo que se limite, muitas vezes, ao fomento à P&D. Considerando que a F6 está concentrada nas companhias de petróleo que assumem o controle da F4, se justifica a ausência de atores públicos e governamentais em posições estratégicas nas redes do STI em processamento submarino. Poucos atores públicos exercem governança sobre as redes de inovação que participam. Caos de exceção encontrados em nossa análise dizem respeito às companhias de petróleo chinesas CNOOC, Sinopec e Petrochina; a Petrobrás e um conjunto de universidades públicas estreitamente ligadas ao sistema de P&D da companhia de petróleo brasileira.

O Quadro 3 apresenta as principais características assumidas pelos componentes do STI em processamento submarino entre 1990-2019, de acordo com os resultados da análise das funções do STI que realizamos. A evolução desse STI teve implicações diretas no processo de emergência das TE em processamento submarino, ainda que seus efeitos sejam diferentes para cada subsistema (ver Quadro 4).

Quadro 3 - Caracterização do STI em processamento submarino de petróleo e gás natural (1990-2019)

Componente	Característica
Tecnologia	‘Marinização’ de tecnologias de processamento de petróleo e gás natural; Eletrificação dos sistemas de produção; Ganhos de confiabilidade e capacidade operacional em regiões de águas profundas e ultra-profundas.
Atores & Redes	Dominância de atores incumbentes (grandes companhias de petróleo com atuação internacional; empresas fornecedoras de equipamentos e serviços); Primazia das interações do tipo usuário-fornecedor. As interações do tipo universidade-empresa são complementares.
Políticas & Instituições	As atividades de inovação são realizadas com apoio público limitado sem apresentar políticas de inovação orientadas a missões específicas no setor de óleo e gás.
Desempenho do sistema	A atividade experimental e a produção de novos conhecimentos têm gerado expectativas positivas em relação ao SPS. Porém, ao se apoiar nos interesses privados das companhias de petróleo, que tem financiado quase que a totalidade dos projetos demonstrativos, essas TE carecem de legitimidade na esfera pública. Desse modo, a introdução dessas tecnologias no portfólio tecnológico da IPGN visa complementar aos sistemas de produção dominantes de E&P.
Contexto	Apesar de um contexto global desfavorável a novos empreendimentos de E&P de petróleo e gás natural, em decorrência da necessária transição energética, o desenvolvimento do SPS foi impulsionado pela perspectiva da continuidade da petrodependência da matriz energética mundial até meados do presente século, gerando expectativas de explorar reservas em regiões de águas profundas e ultra-profundas.

Fonte: Elaboração própria, 2021.

De acordo com as informações apresentadas no Quadro 4, os subsistemas AA e ES apresentam atributos de TE em fase de emergência. O AA tem um impacto limitado no paradigma tecnológico da IPGN, caracterizando-se como uma tecnologia acoplada às infraestruturas existentes de escoamento da produção. Assim sendo, os níveis de novidade radical e incertezas referentes ao AA são baixos. Esse subsistema logrou alcançar um grau de ‘identidade’, ou melhor, coerência em decorrência da consolidação de um desenho dominante. Por sua vez, a ES tem experimentado um acelerado desenvolvimento, sobretudo, a partir da segunda metade da década de 2000 com a abertura de novas fronteiras exploratórias em regiões de águas profundas. Seu nível de novidade radical ainda é considerável, o que significa que a tecnologia está em fase de consolidação. Seu impacto na IPGN é alto, sobretudo na viabilização da produção em reservatórios muito profundos, ou na recuperação avançada de petróleo e gás natural.

Entretanto, a competição entre distintos modelos de bombas indica que, apesar de se tratar de uma tecnologia coerente, pairam incertezas em relação ao potencial dos sistemas de bombeio em descontinuar as plataformas de produção

Por fim, os subsistemas CSG, SS e TRI apresentam atributos que os qualificam como TE em fase de pré-emergência. As tecnologias de SS e TRI têm encontrado dificuldades no que diz respeito ao processo de ‘marinização’ dos artefatos tecnológicos, o que explica seus altos níveis de novidade radical, incoerência no desenho tecnológico e incertezas sobre as capacidades e a segurança operacional dessas tecnologias. O CSG é um subsistema de processamento submarino mais recente na IPGN. O impacto proeminente desses três conceitos tecnológicos é alto, tanto na E&P *offshore*, quanto em atividades correlatas, como a CCUS, o que tem gerado expectativas em relação à aceleração de seu desenvolvimento em médio prazo.

Quadro 4 - Atributos de TE dos subsistemas de processamento submarino de petróleo e gás natural

Atributos da TE	Subsistemas de processamento submarino de petróleo e gás natural				
	AA	CSG	ES	SS	TRI
Novidade radical	Pouca	Considerável	Considerável	Radicalmente novo	Considerável
Ritmo de desenvolvimento	Relativamente lento	Acelerado	Acelerado	Acelerado	Relativamente lento
Coerência	Muito coerente	Relativamente coerente	Relativamente coerente	Incoerente	Incoerente
Impacto proeminente	Limitado	Alto	Alto	Alto	Limitado
Incertezas e ambiguidade	Baixo	Médio	Médio	Alto	Alto

Fonte: Elaboração própria, 2021.

7. Considerações finais

Este artigo demonstrou que, entre 1990 e 2019, a evolução do STI em processamento submarino de petróleo e gás natural, apesar de impulsionar a emergência dessas TE, ainda apresenta elos fracos em relação aos níveis de performance das funções do STI. A F4 tem sido ineficiente para converter as expectativas sobre os SPS em apoio de atores públicos. Entretanto, essa função tem sido capaz de amadurecer a trajetória de desenvolvimento da ES em detrimento dos subsistemas que apresentam característica de tecnologias mais incertas e prototípicas. A falta de apoio público, particularmente, no que diz respeito a políticas públicas destinadas ao desenvolvimento tecnológico da IPGN tem afetado a F6, concentrando o financiamento das atividades de inovação nas mãos das próprias companhias de petróleo, sobretudo, pela riqueza e poderio desse grupo de atores que acaba desviando do Estado, o papel de promotor de novas tecnologias no setor petrolífero. Consequentemente, as funções F4, F6 e F7 são fracas no STI em processamento submarino.

Por sua vez, a implementação de projetos demonstrativos tem sido importante para a ampliação da base de conhecimentos na IPGN. A interação positiva entre F1 e F2 tem fomentado a formação de mercados-nicho (F5) para os SPS nas principais provinciais de E&P *offshore*, particularmente, aquelas caracterizadas por águas profundas e ultra-profundas. Entretanto, apesar do dinamismo entre F1, F2 e F3, deve-se ressaltar que, ao contrário da emergência de tecnologias e indústrias novas, como é o caso das energias renováveis, os atores incumbentes abriram espaços para essas TE em mercados já existentes.

As interações do tipo usuário-fornecedor foram imprescindíveis para a evolução do STI (F3). O aprendizado coletivo resultante da experimentação nos nichos tecnológicos ajudou a estabelecer trajetórias de desenvolvimento para os subsistemas de processamento submarino através de uma estratégia de acoplamento dessas TE aos sistemas de produção dominantes na IPGN. A F3 também reflete uma característica da estrutura industrial do setor petrolífero. O posicionamento das companhias de petróleo nas redes inovação muda, ao longo do tempo analisado, em direção a posições periféricas – salvo algumas exceções. Esse efeito é reflexo do processo de desoneração das atividades de P&D da IPGN, iniciado na década de 1980, em que as companhias de petróleo, antigas proprietárias das tecnologias, transferiram as partes mais apropriáveis do conhecimento tecnológico às suas fornecedoras. Entretanto, as primeiras são fundamentais para o avanço tecnológico nessa área por socializarem conhecimentos comercialmente não-apropriáveis.

O processo de emergência do SPS foi fortemente influenciado pelas mudanças observadas entre 1990 e 2019 em seu STI. A IPGN apresentou importantes passos para a expansão da E&P em águas ultra-profundas. A marinização e eletrificação dos sistemas de produção representam uma transição tecnológica em direção a uma nova geração de equipamentos submarinos, inclusive, endereçados à mitigação de das

emissões diretas das atividades de E&P *offshore*. Entretanto, as incertezas relacionadas à complexidade dessas tecnologias e o questionamento do seu impacto no paradigma tecnológico do segmento de E&P *offshore* da IPGN explica o porquê do processo de emergência do SPS estar muito aquém das expectativas iniciais que criaram a narrativa à qual essas TE inaugurariam o conceito de usina submarina, isto é, substituindo as plataformas de petróleo por sistemas de bombeio e compressão de fluídos escoados do fundo do mar até uma unidade de armazenamento próxima à costa, ao passo que as atividades de E&P *offshore* teriam suas emissões de GEE mitigadas como resultado da separação e injeção submarina de resíduos e GEE, tais quais o CO₂ e o gás metano. Desse modo, o SPS tem sido adotado na IPGN como uma tecnologia complementar ao sistema de produção dominante baseado em plataformas. A análise sugere também que as tecnologias de AA e ES estão em fase de emergência, enquanto CSG, TRI e SS assumem características de TE em fase de pré-emergência, ainda que estes últimos apresentam grande potencial de transbordamento em atividades correlacionadas ao petróleo, como a CCUS.

Por fim, os resultados contribuem para o entendimento de que as políticas públicas são necessárias para promover a emergência de TE em um setor estabelecido como o petrolífero. O caso do SPS demonstra como o processo de emergência tecnológica e inovação é afetado quando um STI emergente está submetido à tomada de decisão de um grupo de atores não diversificados – companhias de petróleo e empresas fornecedoras de equipamentos e serviços. Além disso, debate apresentado fomenta discussões sobre TE e países em desenvolvimento ao sugerir que apesar da apropriação do conhecimento tecnológico concentrar-se em países desenvolvidos, países em desenvolvimento podem assumir posições estratégicas na geração e governança do processo de inovação de uma TE, desde que tenham logrado desenvolver capacidades tecnológicas e inovativas suficientemente robustas que os impulsionem à fronteira tecnológica. Nesse caso, surge a necessidade de os formuladores de política identificarem áreas tecnológicas emergentes articuladas às competências do sistema produtivo e promoverem políticas públicas que tenham como objetivo aproveitar-se das janelas de oportunidade abertas pelas TE.

Emerging technologies in established sectors? Exploring the emergence of subsea oil & gas processing through technological innovation systems approach (1990-2019)

Abstract:

This paper explores the emergence of subsea processing systems (SPS) in the oil and gas industry during the period 1990-2019. Five subsystems related to SPS are considered: subsea gas compression; subsea boosting; subsea water treatment and injection; subsea separation, and direct electric heating. To understand how the dynamics of interaction among actors and institutions involved in innovation activities in SPS are interconnected with its process of emergence, an analysis of the functions of technological innovation systems (TIS) was carried out, based on data from demonstration projects, scientific publications, and patents. The main results of the analysis of the TIS functions identified that the experimental activity, production, and diffusion of new knowledge operate positively for the emergence of the SPS while guidance of the search and creation of legitimacy are characterized as systemic failures that, partially, explain the current barriers to the diffusion of these emerging technologies in the offshore oil & gas sector. Therefore, this paper aims to contribute to the debate on public policies and innovation in established sectors, in addition to reflecting on the role of developing countries in emerging technological areas.

Keywords:

Emerging technologies; Technological innovation systems; Function Analysis; Offshore oil industry; Subsea production systems

Referências bibliográficas

- ALBUQUERQUE, F. A. et al. **Subsea Processing Systems: Future Vision**. . In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. Offshore Technology Conference, 6 maio 2013Disponível em: <<https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-24161-MS>>. Acesso em: 13 maio. 2020
- ARTHUR, W. B. The structure of invention. **Research Policy**, v. 36, n. 2, p. 274–287, 1 mar. 2007.
- ARTHUR, W. B. **The Nature of Technology: What It Is and How It Evolves**. [s.l.] Simon and Schuster, 2009.

AUTIO, E.; HAMERI, A. The structure and dynamics of technological systems: A conceptual model. **Technology & Society**, v. 17, n. 04, p. 365–384, 1995.

BAI, Q.; BAI, Y. **Subsea engineering handbook**. 2. ed. [s.l.] Gulf Professional Publishing, 2018.

BARLOW, J. Innovation and learning in complex offshore construction projects. **Research Policy**, v. 29, n. 7, p. 973–989, 1 ago. 2000.

BENTO, N.; FONTES, M. Emergence of floating offshore wind energy: Technology and industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 99, p. 66–82, 1 jan. 2019.

BERGEK, A. et al. Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. **Research Policy**, v. 37, p. 407–429, 2008.

BERGEK, A. et al. Technological innovation systems in contexts: Conceptualizing contextual structures and interaction dynamics. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 16, p. 51–64, 1 set. 2015.

BP. **BP Energy Outlook 2019**. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-energy-outlook-2019.html>>. Acesso em: 31 out. 2019.

CARLSSON, B. (ED.). **Technological Systems and Industrial Dynamics**. [s.l.] Springer US, 1997.

CARLSSON, B. et al. Innovation systems: analytical and methodological issues. **Research Policy**, Innovation Systems. v. 31, n. 2, p. 233–245, 1 fev. 2002.

CARLSSON, B.; STANKIEWICZ, R. On the nature, function and composition of technological systems. **Journal of Evolutionary Economics**, v. 1, n. 2, p. 93–118, 1 jun. 1991.

CARPENTER, C. How Will Subsea-Processing Technologies Enable Deepwater-Field Developments? **Journal of Petroleum Technology**, v. 69, n. 08, p. 62–63, 1 ago. 2017.

FAGERBERG, J. Innovation: A Guide to the Literature. 2004.

FURTADO, A. T. A trajetória tecnológica da Petrobrás na produção offshore. **Revista Espacios**, v. 17, n. 3, 1996.

FURTADO, A. T. Mudança institucional e inovação na indústria brasileira de petróleo. **Revista Brasileira de Energia**, v. 9, p. 1–12, 2003.

FURTADO, A. T.; FREITAS, A. G. The Catch-up Strategy of Petrobrás through Cooperative R&D. **The Journal of Technology Transfer**, v. 25, n. 1, p. 23–36, 1 mar. 2000.

FURTADO, A. T.; HEKKERT, M. P.; NEGRO, S. O. Of actors, functions, and fuels: Exploring a second generation ethanol transition from a technological innovation systems perspective in Brazil. **Energy Research & Social Science**, v. 70, p. 101706, 1 dez. 2020.

HAMMET, D. S.; LUKE, J. M. **Success and failure: Subsea completions**. OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE PROCEEDINGS. **Anais...** In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. Houston: maio 1986

HEKKERT, M. P. et al. Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 74, n. 4, p. 413–432, maio 2007.

HICKS et al. Bibliometrics: The Leiden Manifesto for research metrics. **Nature**, v. 520, p. 429–431, 23 abr. 2015.

IEA. **World Energy Outlook 2018**. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2018>>. Acesso em: 31 out. 2019.

IEA (ED.). **World Energy Investment 2019**, 2019.

JACOBSSON, S.; BERGEK, A. Transforming the energy sector: the evolution of technological systems in renewable energy technology. **Industrial and Corporate Change**, v. 13, n. 5, p. 815–849, 1 out. 2004.

JACOBSSON, S.; BERGEK, A. Innovation system analyses and sustainability transitions: Contributions and suggestions for research. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 1, n. 1, p. 41–57, 1 jun. 2011.

JONES, J. W. **Subsea production systems – Trends in the nineties**. OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE PROCEEDINGS. **Anais...** In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. Houston: 1995

KANGER, L.; SCHOT, J. Deep transitions: Theorizing the long-term patterns of socio-technical change. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, How History Matters for the Governance of Sociotechnical Transitions. v. 32, p. 7–21, 1 set. 2019.

KEMP, A. **The Official History of North Sea Oil and Gas: Vol. II: Moderating the State's Role**. [s.l.] Routledge, 2013a.

KEMP, A. **The Official History of North Sea Oil and Gas: Vol. I: The Growing Dominance of the State**. [s.l.] Routledge, 2013b.

LANDES, D. **The unbound Prometheus: technological change and industrial development in Western Europe from 1750 to the present**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

LEGEAY, J.; HAZEL, T.; PEREGRYM, G. **Powering Subsea Processing Facilities of the Future**. . In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. Offshore Technology Conference, 6 maio 2013Disponível em: <<https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-23935-MS>>. Acesso em: 13 maio. 2020

MÅKITIE, T. et al. Established sectors expediting clean technology industries? The Norwegian oil and gas sector's influence on offshore wind power. **Journal of Cleaner Production**, v. 177, p. 813–823, 10 mar.

2018.

MARKARD, J. The life cycle of technological innovation systems. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 153, p. 119407, 1 abr. 2020.

MASON, P. **Evolution of subsea well system technology**. OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE PROCEEDINGS. **Anais...** In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. Houston: jul. 2006

MCKINSEY (ED.). **The future of oil and gas is now: How companies can decarbonize**, 7 jan. 2020. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-future-is-now-how-oil-and-gas-companies-can-decarbonize>>. Acesso em: 15 ago. 2020

MOED, H. F.; GLÄNZEL, W.; SCHMOCH, U. (EDS.). **Handbook of Quantitative Science and Technology Research**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005.

NEGRO, S. O.; HEKKERT, M. P.; SMITS, R. E. Explaining the failure of the Dutch innovation system for biomass digestion—A functional analysis. **Energy Policy**, v. 35, n. 2, p. 925–938, 1 fev. 2007.

NETO, J. B. O.; SHIMA, W. T. Trajetórias tecnológicas no segmento offshore: ambiente e oportunidades. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 12, n. 2, p. 301–332, ago. 2008.

OFFSHORE MAGAZINE; INTECSEA. **2019 Worldwide survey of active heating**, fev. 2019a. Disponível em: <[https://cdn.offshore-](https://cdn.offshore-mag.com/files/base/ebm/os/document/2019/05/Active_Heating_Projects_updated_for_2019___JMorgan_02_26_19.5cf0447ce29a7.pdf)

[mag.com/files/base/ebm/os/document/2019/05/Active_Heating_Projects_updated_for_2019___JMorgan_02_26_19.5cf0447ce29a7.pdf](https://cdn.offshore-mag.com/files/base/ebm/os/document/2019/05/Active_Heating_Projects_updated_for_2019___JMorgan_02_26_19.5cf0447ce29a7.pdf)>. Acesso em: 21 jan. 2020

OFFSHORE MAGAZINE; INTECSEA (EDS.). **2019 Worldwide survey of subsea processing**, mar. 2019b. Disponível em: <[https://cdn.offshore-](https://cdn.offshore-mag.com/files/base/ebm/os/document/2019/05/Active_Heating_Projects_updated_for_2019___JMorgan_02_26_19.5cf0447ce29a7.pdf)

[mag.com/files/base/ebm/os/document/2019/05/Active_Heating_Projects_updated_for_2019___JMorgan_02_26_19.5cf0447ce29a7.pdf](https://cdn.offshore-mag.com/files/base/ebm/os/document/2019/05/Active_Heating_Projects_updated_for_2019___JMorgan_02_26_19.5cf0447ce29a7.pdf)>. Acesso em: 21 jan. 2020

RIBEIRO, C. et al. The influence of user-supplier relationship on innovation dynamics of Oil & Gas industry. **Technology Analysis & Strategic Management**, v. 32, n. 2, p. 119–132, 2020.

ROTOLO, D.; HICKS, D.; MARTIN, B. R. What is an emerging technology? **Research Policy**, v. 44, n. 10, p. 1827–1843, 1 dez. 2015.

RUAS, J. A. G. **Dinâmica de concorrência na indústria parapetrolífera offshore: evolução mundial do setor de equipamentos subsea e o caso brasileiro**. Tese (Doutorado)—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2012.

RUUD, T. et al. **All Subsea: A Vision for the Future of Subsea Processing**. . In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. Offshore Technology Conference, 4 maio 2015Disponível em: <<https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-25735-MS>>. Acesso em: 13 maio. 2020

SCHOT, J.; GEELS, F. W. Strategic niche management and sustainable innovation journeys: theory, findings, research agenda, and policy. **Technology Analysis & Strategic Management**, v. 20, n. 5, p. 537–554, 1 set. 2008.

SUURS, R. A. A. **Motors of sustainable innovation. Towards a theory of the dynamics of technological innovation systems**. Utrecht: Utrecht University, 2009.

THE GUARDIAN. What do we know about the top 20 global polluters? 9 out. 2019.

ZHANG, G. et al. Giant discoveries of oil and gas fields in global deepwaters in the past 40 years and the prospect of exploration. **Journal of Natural Gas Geoscience**, v. 4, n. 1, p. 1–28, 1 fev. 2019.