

# A emergência do processamento submarino de petróleo e gás natural sob a perspectiva dos sistemas tecnológicos de inovação (1990-2019)

*Emergence of oil & gas subsea processing from a technological innovation systems perspective (1990-2019)*

*Matheus Gonçalves da Silva Pereta <sup>(1)</sup>*

*André Tosi Furtado <sup>(1)</sup>*

*Janaína Oliveira Pamplona da Costa <sup>(1)</sup>*

<sup>(1)</sup> Universidade Estadual de Campinas

## Abstract

This article examines the emergence of subsea processing technologies in the global oil and gas industry during the period 1990-2019. Five subsystems related to subsea processing are considered: subsea gas compression; subsea boosting; subsea water treatment and injection; subsea separation and direct electric heating. Our analytical framework is based on the perspective of technological innovation system, focusing in the functions of the system. The system functioning analysis is based upon data from demonstration projects, scientific publications, and patents. Our main research question is: How the interactions between functions interconnect with the emergence of subsea processing in this period? We identified that system functioning have positive effects on adoption and diffusion of these new technologies. This article contributes to the debate on public policies and innovation in established sectors, as well discuss the role of developing countries in emerging technological areas.

## Keywords

emerging technologies, technological innovation systems, function analysis, offshore oil industry, subsea systems.

**JEL Codes** O31, O33.

## Resumo

*Este artigo explora o processo de emergência de tecnologias de processamento submarino na indústria mundial de petróleo e gás natural entre 1990-2019. O processamento submarino é constituído pelos seguintes subsistemas: compressão submarina de gás; bombeio elétrico submarino; separação submarina; tratamento e (re) injeção submarina de água e aquecimento ativo das linhas de fluxo. O quadro analítico se apoia nas funções do sistema tecnológico de inovação. As funções são analisadas a partir de dados de projetos demonstrativos, publicações científicas e patentes. Investiga-se como as interações entre as funções do sistema tecnológico se interconectam com o processo de emergência do processamento submarino nesse período. Identifica-se que as funções têm efeitos positivos para a introdução e difusão dessas novas tecnologias. O artigo contribui para o debate sobre políticas públicas e inovação em setores maduros, além de discutir o papel de países em desenvolvimento em áreas tecnológicas emergentes.*

## Palavras-chave

*tecnologias emergentes, sistemas tecnológicos de inovação, funções dos sistemas de inovação, indústria do petróleo offshore, sistemas submarinos.*

**Códigos JEL** O31, O33.

## 1 Introdução

As emissões de gases do efeito estufa (GEE), sobretudo a liberação do dióxido de carbono proveniente da queima de combustíveis fósseis, correspondem a uma das principais forçantes antropogênicas das mudanças climáticas (Goldemberg; Lucon, 2007). Dessa maneira, a transformação dos sistemas energéticos em direção às energias renováveis pavimenta um processo de reconfiguração da matriz energética mundial. Todavia, 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 as reduções emergenciais das emissões de GEE, em paralelo à ampliação do acesso das populações em situação de vulnerabilidade à energia, configuram os desafios da atual transição energética. Nas projeções de cenários de transição, países com importantes reservas de gás natural – por exemplo, o Brasil – figuram como atores fundamentais para o suprimento de recursos energéticos à demanda crescente mundial até meados do século XXI (BP, 2019; IEA, 2020). Nesse contexto, é mister desenvolver soluções tecnológicas não somente direcionadas ao abatimento das emissões diretas da indústria do petróleo e gás natural (IPGN), mas também ao aumento da eficiência da produção em campos maduros e ao acesso a recursos energéticos em reservatórios complexos.

O segmento de exploração e produção (E&P) *offshore*<sup>1</sup> em regiões de lâminas d'água (LDA) profundas e ultraprofundas<sup>2</sup> representa a fronteira exploratória e principal frente de expansão tecnológica da IPGN no período recente. O aumento da profundidade de LDA das atividades *offshore* desencadeia um processo de “marinização”<sup>3</sup> dos equipamentos e sistemas de produção de petróleo e gás natural, em que a elevação da complexidade da E&P em LDA muito profundas estimulou o desenvolvimento de artefatos tecnológicos submarinos (Jones, 1995).

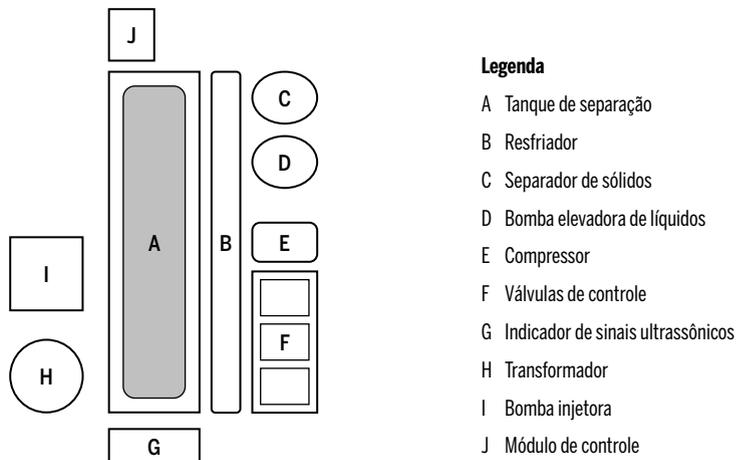
.....  
 1 A E&P de petróleo e gás natural está relacionada às operações de exploração (prospecção de jazidas e perfuração de poços exploratórios) e produção (extração comercial das acumulações de hidrocarbonetos identificadas na fase de exploração). As atividades de E&P se dão em terra (*onshore*) ou na água (*offshore*).

2 Águas rasas: LDA de até 400m. Águas profundas: LDA entre 401 e 1.500m. Águas ultraprofundas: LDA superior a 1.500m.

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

A dinâmica tecnológica da IPGN *offshore* corroborou o surgimento de um setor de equipamentos submarinos. Este, por sua vez, se especializou em tecnologias dedicadas ao controle da produção e transporte de fluidos. Desde a década de 1990, um conjunto de tecnologias relacionadas ao processamento submarino de petróleo e gás natural emerge na fronteira tecnológica da E&P. O processamento submarino integra subsistemas elétricos de bombeio, compressão, separação, tratamento de contaminantes, regulagem e controle da produção em uma arquitetura conceitual denominada “plataforma invisível”. A Figura 1 esquematiza o conceito tecnológico de “plataforma invisível” a partir de um conjunto de subsistemas de processamento submarino.

Figura 1 Esquema conceitual de “plataforma invisível” baseada em subsistemas de processamento submarino de petróleo e gás natural



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

O desenvolvimento de tecnologias de processamento submarino vislumbra a substituição das plataformas por arranjos de sistemas submersos conectados a uma unidade de produção no continente. Alguns projetos *offshore* no Mar do Norte e Brasil têm sido pioneiros na instalação desses novos conceitos tecnológicos (*Offshore Magazine*, 2019a; 2019b). Entretanto, muitas dessas iniciativas estão limitadas ao acoplamento dessas novas tecnologias às plataformas de petróleo. Dessa maneira, apesar do caráter mais complementar que disruptivo do processamento submarino, no período

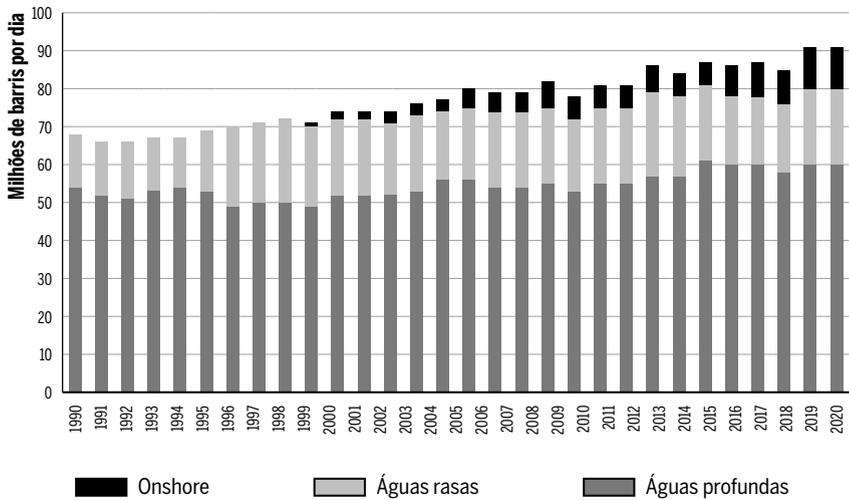
recente, a experimentação é fundamental para a viabilização de sua adoção em projetos de fronteira tecnológica, tais quais as águas (ultra)profundas.

O objetivo deste artigo é investigar a dinâmica de geração, desenvolvimento, uso e difusão de tecnologias de processamento submarino e sua influência na emergência dessas tecnologias através de uma análise das funções do sistema tecnológico de inovação global entre 1990-2019. O artigo está organizado em mais cinco seções, além desta introdução. A segunda seção ilustra o enquadramento conceitual-analítico, discutindo o processamento submarino à luz das noções de tecnologias emergentes e sistemas tecnológicos de inovação. A terceira seção descreve a metodologia que sustenta a análise empírica apresentada na quarta seção. A quinta seção caracteriza o processo de emergência das tecnologias de processamento submarino à luz dos resultados da análise das funções do sistema tecnológico. Finalmente, as conclusões encerram o artigo.

## **2 Processamento submarino: uma tecnologia emergente na indústria petrolífera?**

As atividades da E&P *offshore*, até meados de 1960, posicionavam os sistemas de controle e regulação da produção sobre os deques das plataformas (completação seca). O avanço da IPGN em águas profundas abriu possibilidades de desenvolvimento de novas tecnologias, e uma indústria de equipamentos submarinos viabilizou a E&P de novas fronteiras exploratórias, engendrando uma transição tecnológica em direção à completação “molhada” baseada em sistemas submarinos de produção (Barlow, 2000; Hammet; Luke, 1986).

Desde a primeira descoberta de reservas de petróleo e gás natural em águas profundas na década de 1970, o avanço em direção ao *offshore* profundo tem movimentado uma frente de expansão tecnológica no setor petrolífero. No século XXI, mais da metade das descobertas de reservas gigantes de hidrocarbonetos ocorreram em regiões de águas profundas (Zhang *et al.*, 2019). A Figura 2 apresenta a evolução da produção de petróleo *onshore* e *offshore* entre 1990 e 2020. Em média, a produção *offshore* representou 30% do total da produção de petróleo mundial entre 2005-2015 (EIA, 2016b). Além disso, a E&P em águas profundas e ultraprofundas apresenta tendência de crescimento no período recente (EIA, 2016a).

Figura 2 Produção mundial de petróleo *onshore* e *offshore*, 1990-2020

Fonte: Adaptado de BP Statistical Review, 2014. Nota: A produção de petróleo entre 2015-2020 é uma projeção.

No contexto de expansão do *offshore* profundo, a evolução da indústria de equipamentos submarinos apresenta três ciclos de desenvolvimento (Ruas, 2012). No primeiro ciclo (1960-1970), a carência de padronização tecnológica limitou a adoção de equipamentos submarinos na IPGN, ainda que diversos protótipos estivessem em desenvolvimento. O segundo ciclo (1980-1990) consolidou desenhos dominantes e parâmetros operacionais de algumas tecnologias submarinas para aplicações em águas profundas, tais quais as Árvores de Natal Molhadas,<sup>4</sup> umbilicais<sup>5</sup> e *manifolds*<sup>6</sup>. O terceiro ciclo teve início nos anos de 1990. Nesse período, além do amadurecimento de trajetórias tecnológicas que corroboraram o avanço da IPGN nas águas ultraprofundas, a consolidação da E&P em águas profundas motivou o direcionamento de esforços que promoveram uma nova geração

4 Conjunto de válvulas operadas remotamente que controlam o fluxo de fluidos produzidos ou injetados.

5 Conjunto de mangueiras e cabos elétricos utilizados para operar remotamente outros equipamentos e válvulas submarinas, bem como injetar produtos químicos e monitorar parâmetros operacionais.

6 Conjunto de válvulas e acessórios que direcionam a produção dos poços submarinos para um duto coletor. Além disso, pode ser utilizado para comunicar diferentes poços a um sistema de injeção de água/gás.

de tecnologias submarinas de produção, entre os quais o processamento submarino e veículos operados remotamente<sup>7</sup>.

No caso específico das tecnologias de processamento submarino, seu desenvolvimento está direcionado à superação dos seguintes gargalos da E&P *offshore* em águas (ultra)profundas: viabilização econômica da produção submarina e fornecimento de energia necessária à elevação artificial dos fluidos produzidos até as unidades de processamento. Dessa maneira, os principais objetivos dessas tecnologias são: bombeio e compressão submarina de fluidos; tratamento elétrico de elementos contaminantes nos fluidos produzidos; separação e injeção de dióxido de carbono e água residual das atividades de E&P (Bai; Bai, 2018). Além disso, a integração de novas tecnologias de informação e comunicação ao processamento submarino engendra um processo de digitalização e automação dos processos de produção a fim de aumentar a eficiência e segurança operacional dessas tecnologias (*Offshore Magazine*, 2018).

Tabela 1 **Caracterização dos subsistemas de processamento submarino de petróleo e gás natural**

<b>Subsistema</b>	<b>Artefato tecnológico</b>	<b>Características principais</b>
BES	Bomba elétrica	Aprimoramento 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; facilitação do transporte de fluidos produzidos.
CSG	Compressor	Aumento do nível de recuperação e viabilização da produção de campos satélites interconectados.
SS	Separador	Separação dos fluxos de líquidos e gás; separação de água e contaminantes dos fluidos produzidos; diminuição da razão pressão/energia de estimulação nos poços.
TRI	Bomba injetora	Injeção de resíduos (GEE e contaminantes) em poços injetores.
AA	Cabo de força acoplado 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.

7 Robôs submersíveis que realizam e monitoram atividades de montagem dos demais equipamentos submarinos de produção, particularmente em grandes profundidades.

O desenvolvimento do processamento submarino também está relacionado ao processo de eletrificação dos sistemas de produção de petróleo e gás natural (Legeay *et al.*, 2013). No presente artigo, cinco subsistemas que compõem o processamento submarino são considerados: bombeio elétrico submarino (BES); 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 Tabela 1 descreve as principais características desses subsistemas.

Considerando o avanço da fronteira tecnológica do setor petrolífero no contexto de expansão da IPGN em águas (ultra)profundas, os subsistemas de processamento submarino articulam novas trajetórias tecnológicas na E&P *offshore*. Entretanto, essas tecnologias ainda não são maduras. Dessa maneira, é possível investigar se e como o processamento submarino assume características de tecnologia emergente na IPGN. Neste artigo, o conceito de tecnologias emergentes se refere a

*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 et al., 2015, p. 1.828, tradução nossa).*

A Tabela 2 caracteriza os atributos das tecnologias emergentes em referência às fases do processo de emergência tecnológica. Na fase de pré-emergência, uma tecnologia emergente é radicalmente nova em relação à configuração tecnológica hegemônica. Contudo, seu impacto é pequeno no domínio em que surge. Sua arquitetura conceitual é incoerente; consequentemente seu ritmo de desenvolvimento é lento, tendo em vista os altos índices de incerteza e ambiguidade associados ao futuro dessa nova tecnologia. Nessa fase, o desempenho dessas tecnologias não é próximo de suas potencialidades, o que pode limitar seu processo de emergência.

Na fase de emergência, conformam-se trajetórias tecnológicas relacionadas às tecnologias emergentes que orientam a evolução dessas tecnologias em direções selecionadas. Por um lado, os níveis de coerência tecnológica aumentam, por outro, a consolidação dessas trajetórias limita o potencial de novidade radical. Além disso, o aumento da intensidade das atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D) pode gerar expectativas

positivas sobre o impacto futuro dessas tecnologias, diminuindo incertezas e ambiguidades.

**Tabela 2** Descrição dos atributos de uma tecnologia emergente em referência ao seu processo de emergência tecnológica

Atributo	Descrição	Fase do processo de emergência tecnológica		
		Pré-emergência	Emergência	Pós-emergência
<b>Novidade radical</b>	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
<b>Ritmo de desenvolvimento</b>	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
<b>Coerência</b>	Força da “identidade” da tecnologia ao longo do tempo.	Incoerente	Relativamente coerente	Muito coerente
<b>Impacto proeminente</b>	Amplitude dos efeitos da tecnologia emergente nos domínios específicos em que se aplica, ou no sistema socioeconômico.	Limitado	Considerável	Alto
<b>Incerteza e ambiguidade</b>	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 et al., 2015.

Finalmente, na fase de pós-emergência, a tecnologia emergente se consolida como um sistema incumbente que se caracteriza por um desenho tecnológico dominante e coerente. Assim como seus níveis de incerteza e ambiguidade, a tecnologia emergente apresenta baixa novidade radical. Em decorrência do ritmo desacelerado de desenvolvimento de novos conhecimentos, os avanços das tecnologias emergentes são baseados em inovações incrementais.

Apesar da contribuição conceitual da noção de tecnologia emergente discutida neste artigo, faz-se necessário questionar como as especificida-

des do processo de emergência tecnológica influenciam mudanças nos seus atributos. Dessa maneira, é mister identificar, descrever e analisar a dinâmica dos processos inovativos que influenciam a emergência de uma nova tecnologia. A fim de dar cabo desse desafio metodológico e analítico, a abordagem dos sistemas tecnológicos de inovação (STI) é considerada como um ferramentário teórico-analítico convergente à investigação e operacionalização do conceito de tecnologia emergente.

Um STI se define como uma rede de atores interagindo em um espaço econômico/industrial sob uma infraestrutura institucional particular para desempenhar atividades de geração, difusão e utilização de uma tecnologia (Carlsson; Stankiewicz, 1991, pp. 94, tradução nossa). A abordagem do STI tem sido empregada, particularmente em estudos que investigam o desenvolvimento e difusão de novas tecnologias de baixa emissão de carbono ou renováveis e os processos que influenciam a mudança tecnológica nos sistemas energéticos (Jacobsson; Bergek, 2004).

Uma primeira onda de estudos de STI se preocupou em avaliar a habilidade de geração de novas tecnologias em setores industriais consolidados, visando às recomendações de políticas orientadas ao aprimoramento do desempenho inovativo dessas indústrias (Autio; Hameri, 1995; Carlsson, 1997). No período recente, os estudos dos STIs investigam o codesenvolvimento de novas tecnologias e seus respectivos sistemas de inovação a fim de identificar os fatores explicativos do sucesso ou fracasso de sua emergência, amadurecimento e, mais recentemente, seu declínio (Markard, 2020).

A introdução da perspectiva das funções do STI (ver Tabela 3) teve o objetivo de analisar os processos dinâmicos no interior dos STIs que influenciam a geração, desenvolvimento e difusão de uma nova tecnologia (Bergek *et al.*, 2008; Hekkert *et al.*, 2007). As funções do STI, por um lado, elucidam o processo de formação dos elementos estruturantes dos STIs, a saber, a atores, redes e instituições em um dado contexto. Por outro lado, visam à compreensão dos eventos determinantes da falha e sucesso na introdução e difusão de uma nova tecnologia, bem como dos mecanismos de interação entre os processos-chave da inovação que aceleram ou debilitam a mudança tecnológica (Bergek *et al.*, 2015; Hekkert *et al.*, 2007; Suurs; Hekkert, 2009).

No presente artigo, a abordagem do STI lança luz sobre as especificidades do processo de emergência das tecnologias de processamento submarino na IPGN ao longo do período 1990-2019. A análise das funções do

STI não se limita à caracterização dos atributos de tecnologias emergentes. Além disso, busca-se identificar os fenômenos explicativos de possíveis transformações observadas nas trajetórias tecnológicas dos cinco subsistemas de processamento submarino de petróleo e gás natural considerados neste estudo.

Tabela 3 **Funções do STI**

<b>Funções do sistema</b>	<b>Descrição</b>
<b>Atividade empreendedora experimental</b>	O papel da atividade empreendedora em transformar o potencial dos novos conhecimentos produzidos, redes e mercados, em ações geradoras de vantagens competitivas e oportunidades.
<b>Produção de novos conhecimentos</b>	Novos conhecimentos em relação à base de conhecimentos de uma tecnologia.
<b>Difusão do conhecimento</b>	Mecanismos de aprendizado no processo de inovação.
<b>Orientação da busca</b>	Atividades que podem afetar as expectativas compartilhadas sobre a trajetória de desenvolvimento de uma nova tecnologia.
<b>Formação de mercado</b>	Criação de espaços de proteção para novas tecnologias (mercados-nicho) a fim de estimular seu desenvolvimento, protegendo-a dos mecanismos de seleção do mercado, ainda que, temporariamente.
<b>Mobilização de recursos</b>	Capacidades de mobilização de recursos financeiros e humanos.
<b>Criação de legitimidade</b>	Coalizão de apoios que legitimam o desenvolvimento de uma nova tecnologia, ou a criação de convenções que atenuam a resistência à mudança tecnológica.

Fonte: Adaptado de Hekkert et al., 2007.

### 3 Metodologia

A coleta de dados de projetos demonstrativos, publicações científicas e patentes de invenção possibilitou à análise empírica combinar diferentes métodos quantitativos e qualitativos para operacionalizar o conceito de tecnologia emergente. Todos os dados são limitados ao período 1990-2019.

Os dados de projetos demonstrativos em tecnologias de processamento submarino foram extraídos de dois *surveys* organizados pela *Offshore Magazine* a fim de sistematizar informações técnicas e identificar atores da IPGN envolvidos na experimentação e promoção dessas tecnologias em projetos industriais. Excluídos os projetos com informações insuficientes, a amostra final contabiliza 91 projetos implementados.

As informações sobre publicações científicas (artigos e trabalhos em anais de congressos) foram coletadas na base Scopus. Os dados de patentes concedidas foram coletados na base Derwent Innovation Index. Esses dados foram levantados combinando palavras-chave e códigos de IPCs para as patentes. A equação de busca de publicações científicas foi a seguinte: ((SUBSEA OR SUBMERSIBLE) AND (PUMP\* OR PROCESS\* OR "GAS COMPRESS\*" OR "ELECTRIC\* HEAT\*" OR SEPARAT\*) AND (OFFSHORE AND (OIL OR GAS))). A seguinte equação foi utilizada para realizar a busca de patentes: ((E21B-033/00 OR E21B-033/035 OR E21B-41/00 OR E21B-043/00 OR E21B043/01 OR E21B-043/12 OR E21B-043/36 OR E21B-043/38 OR E21B-047/00 OR F04B- 047/00 OR F04B-047/06 OR F04D-013/00 OR F04D-013/08 OR F04D-013/10 OR F04D015/00 OR F04D-029/00 OR F04D-031/00 OR H02K-05/132) AND (SUBSEA OR SUBMERSIBLE) AND (PUMP\* OR "GAS COMPRESS\*" OR SEPARAT\* OR PROCESS\* OR "ELECTRIC\* HEAT\*") AND (OFFSHORE AND (OIL OR GAS))).

Após a etapa de mineração de dados, a amostra final utilizada na análise empírica corresponde a 1.624 publicações e 1.872 patentes. As informações dessas amostras foram sistematizadas em indicadores bibliométricos e patentométricos. Esses procedimentos metodológicos, majoritariamente quantitativos, revelam aspectos da dinâmica dos campos científicos e tecnológicos. Ainda que uma parcela considerável do conhecimento seja tácita e não codificável, a combinação da análise quantitativa à qualitativa (análise de conteúdo) permite ampliar a compreensão de aspectos significativos da dinâmica de campos científicos e tecnológicos emergentes (Möed *et al.*, 2005).

A análise de redes visualiza a dinâmica de interação dos atores envolvidos nas atividades de inovação em tecnologias de processamento submarino que estruturam relações diádicas<sup>8</sup>. As interações entre companhias de petróleo, empresas fornecedoras e organizações de pesquisa (universidades, institutos de pesquisa, laboratórios públicos) que executam projetos demonstrativos; compartilham a autoria de um artigo ou a titularidade<sup>9</sup> de

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

9 A opção pela cotitularidade das patentes, em vez da coinvenção se deu 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.

uma patente referente a tecnologias de processamento submarino. Sendo assim, são consideradas as seguintes categorias de redes: a) redes de clientes-fornecedores em projetos demonstrativos; b) redes de colaboração de pesquisa (publicações em coautoria); e c) redes de cooperação tecnológica (patentes em cotitularidade).

A partir desses dados, realizou-se uma análise das funções do STI a fim de investigar os processos-chave que influenciam a evolução do STI em processamento submarino. Essa análise examina o desempenho de algumas funções na dinâmica do STI.<sup>10</sup> Finalmente, os resultados da análise das funções aportam uma interpretação do processo de emergência do processamento submarino, em referência aos atributos de tecnologias emergentes.

## **4 Análise das funções do STI em processamento submarino de petróleo e gás natural**

A seguinte análise das funções do STI explora os processos-chave que afetaram a emergência de tecnologias de processamento submarino no período 1990-2019. O desempenho das seis funções consideradas no presente artigo é analisado separadamente nesta seção.

### **4.1 Atividade empreendedora experimental**

O aumento do número de projetos demonstrativos em processamento submarino implementados na IPGN *offshore* entre 1990-2019 teve o objetivo de acelerar a curva de aprendizado e ganho de escala desses projetos em nível industrial (ver Tabela 4). Ao mesmo tempo, buscou-se apoio de potenciais usuários à adoção e difusão dessas tecnologias emergentes. Essa função foi positiva para que os subsistemas definissem trajetórias de desenvolvimento, conformando uma “identidade” tecnológica que direciona seu processo de inovação. Além disso, viabilizou a demonstração dessas tecnologias em águas profundas e ultraprofundas, através do aprimoramento de sua capacidade e segurança operacional.

.....  
10 Por insuficiência de dados sobre recursos de P&D e investimentos diretamente relacionados ao desenvolvimento de tecnologias de processamento submarino, a função “Mobilização de recursos” não será analisada neste artigo.

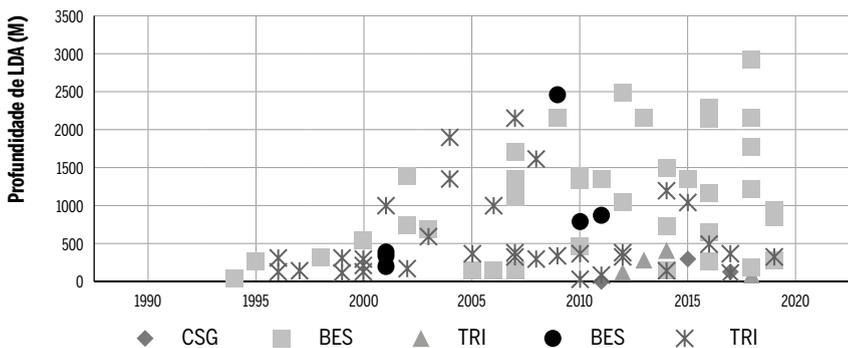
Tabela 4 Projetos demonstrativos em tecnologias de processamento submarino implementados na IPGN (1990-2019)

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

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Offshore Magazine, 2019a; 2019b.

Os efeitos dos critérios de seleção do meio ambiente e das características particulares dos nichos que desenvolvem o processamento submarino inauguraram distintas trajetórias para os subsistemas de CSG, BES, TRI, SS e AA. Por sua vez, a aprendizagem decorrente da experimentação tecnológica viabilizou a aplicação do processamento submarino no *offshore* profundo (ver Figura 3). A difusão do BES em águas cada vez mais profundas sugere que a *expertise* acumulada em diferentes metodologias de elevação artificial, desde a década de 1980, e os interesses da IPGN na exploração de recursos energéticos em águas ultraprofundas têm amadurecido esse subsistema. A limitação da experimentação dos subsistemas de CSG e TRI a províncias exploratórias em águas rasas sugere que essas tecnologias emergentes se encontram em um estágio prototípico e experimental.

Figura 3 Evolução das capacidades operacionais em profundidade de LDA por subsistemas de processamento submarino (1990-2019)



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Offshore Magazine, 2019a; 2019b.

A presente análise identificou 44 atores, entre companhias de petróleo e empresas fornecedoras, envolvidas na implementação dos projetos de

monstrativos. A Equinor implementou mais projetos demonstrativos no período analisado (ver Tabela 5). Todavia, a Petrobras liderou as atividades de experimentação em sistemas de processamento submarino (SPS) na década de 2010. Isso se explica pelo sucesso do processo de emparelhamento (*catching-up*) da companhia de petróleo brasileira no estabelecimento de uma estratégia tecnológica baseada na participação nas redes internacionais de conhecimento e P&D colaborativa em programas tecnológicos dedicados à identificação e desenvolvimento endógeno de tecnologias de E&P *offshore* desde as décadas de 1980 e 1990 (Furtado; Freitas, 2000) ao impulsionar a demanda de tecnologias adequadas à viabilização da E&P comercial das reservas do pré-sal.

Tabela 5 **Organizações que mais implementaram projetos demonstrativos em processamento submarino (1990-2019)**

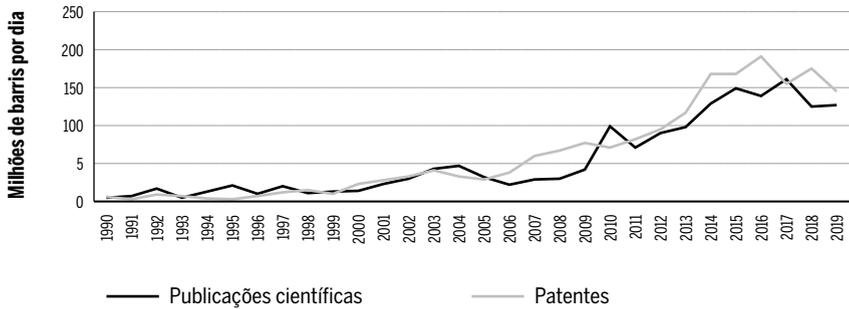
Companhia de petróleo	País-sede	Nº de projetos	Empresa fornecedora	País-sede	Nº de projetos
Equinor	Noruega	20	TechnipFMC	Reino Unido Estados Unidos França	32
Petrobras	Brasil	13	Onesubsea	Estados Unidos	30
Shell	Países Baixos Reino Unido	13	Subsea 7	Reino Unido	16
Total	França	6	Nexans	França	13
Chevron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

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Offshore Magazine, 2019a; 2019b.

## 4.2 Produção de novos conhecimentos

A produção de novos conhecimentos científicos (publicações) e tecnológicos (patentes) em processamento submarino apresenta tendência de crescimento que reforça sua caracterização como área tecnológica emergente na IPGN (ver Figura 4). Áreas emergentes do conhecimento abrem janelas de oportunidades para a obtenção de vantagens competitivas baseadas nas capacidades de acumulação e apropriação dos atores na fronteira do conhecimento. Essa função é uma *proxy* dos resultados dos esforços de P&D dos atores que desenvolvem essas tecnologias emergentes.

Figura 4 **Evolução das publicações científicas e tecnológicas em processamento submarino (1990-2019)**



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Scopus, 2019; Derwent Innovation Index, 2019.

A dinâmica de produção de novos conhecimentos científicos em tecnologias de processamento submarino está orientada para a pesquisa corporativa de companhias de petróleo e suas fornecedoras, em detrimento da acadêmica (ver Tabela 6). As companhias de petróleo (Petrobras, Equinor, Shell, Total e BP) e as empresas fornecedoras (TechnipFMC, Schlumberger, Aker e Saipem) representam um grupo de atores que, historicamente, contribuem para o avanço da fronteira do conhecimento no segmento *offshore* da IPGN, através do lançamento de soluções tecnológicas. Dessa maneira, esses atores lograram desenvolver uma ampla base de conhecimentos que os habilitaram a explorar a fronteira tecnológica relacionada ao processamento submarino.

Por sua vez, a dinâmica de produção de conhecimentos tecnológicos indica que, à exceção de companhias de petróleo chinesas (Petrochina, CNOOC e Sinopec), as empresas fornecedoras (Baker Hughes, Schlumberger, GE, Halliburton, Vetco Gray, Tsurumi Seisakusho e Summit ESP) representam o grupo de atores que detiveram mais títulos de patentes concedidas em tecnologias de processamento submarino no período analisado. Por fim, à exceção da Norwegian Science & Technology University, nenhuma outra organização de pesquisa é listada no *ranking*. Dessa maneira, a pesquisa acadêmica tem caráter complementar na dinâmica de produção de novos conhecimentos.

A análise dessa função indica a existência de duas categorias de conhecimento produzidas pelos atores envolvidos em atividades de inovação em processamento submarino. A primeira categoria diz respeito aos conhecimentos comercialmente não apropriáveis, ou seja, aqueles derivados

de pesquisa corporativa, majoritariamente levados a cabo pela iniciativa privada, identificados nas publicações científicas que relatam, revisam e exploram aplicações e usos de uma tecnologia, aportando técnica e cientificamente a inovação. Esse conhecimento não é comercialmente apropriável porque socializa, até mesmo entre os concorrentes daquele que o gerou, informações estratégicas fundamentais para o desenvolvimento de uma nova tecnologia. A segunda categoria, por sua vez, representa os conhecimentos comercialmente apropriáveis protegidos pela propriedade intelectual como recompensa dos esforços de inovação.

Tabela 6 **Organizações que mais publicaram artigos científicos e patentes em processamento submarino (1990-2019)**

Artigos científicos			Patentes		
Organização	País-sede	Nº de documentos	Organização	País-sede	Nº de documentos
Petrobrás	Brasil	102	Baker Hughes	Estados Unidos	127
TechnipFMC	Reino Unido	101	Schlumberger	França	99
	Estados Unidos			Estados Unidos	
Schlumberger	França	92	Petrochina	China	66
	Estados Unidos			Reino Unido	
Equinor	Noruega	88	General Electric	Estados Unidos	62
Shell	Países Baixos	83	CNOOC	China	43
	Reino Unido				
Norwegian S & T U.	Noruega	72	Tsurumi Seisakusho	Japão	34
Total	França	61	Sinopec	China	31
Aker	Noruega	52	Summit ESP	Estados Unidos	29
BP	Reino Unido	48	Halliburton	Estados Unidos	26
Saipem	Itália	31	Vetco Gray	Reino Unido	21

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Scopus, 2019; Derwent Innovation Index, 2019.

Além disso, os resultados dessa função estão alinhados aos achados de outros estudos que identificaram as seguintes tendências sobre os esforços inovativos das companhias de petróleo e suas fornecedoras no período recente. Primeiro, os resultados dos esforços inovativos das empresas forne-

cedoras em atividades do *upstream* em relação às companhias de petróleo é maior se se considera a publicação de patentes. Essa tendência corrobora a ideia de que a indústria para-petrolífera tem assumido maiores riscos de inovação nas áreas tecnológicas que se especializaram, tais quais a E&P de águas profundas – importante área de negócios para essas empresas fornecedoras. Sendo assim, a liderança de empresas fornecedoras no patenteamento de tecnologias de processamento submarino, ao longo do período analisado, é reflexo dos efeitos da reestruturação da divisão do trabalho inovativo da IPGN (Furtado, 1997; Ribeiro *et al.*, 2020).

Entretanto, não se pode afirmar que as companhias de petróleo não realizam esforços inovativos significativos para o desenvolvimento de novas tecnologias. Por exemplo, se se considera a intensidade de P&D como um indicador-chave, notar-se-á que a intensidade de P&D das companhias de petróleo é, geralmente, menor em relação às suas fornecedoras, ainda que as companhias de petróleo tenham despendido os maiores volumes de recursos em P&D no período recente (Strategy&, 2019). Além disso, são reconhecidos a existência de estudos que investigaram o portfólio tecnológico das patentes de importantes companhias de petróleo (ExxonMobil, Shell, Chevron, CNPC, BP, Total, Gazprom, Petrobras e Sinopec) nas áreas de E&P, *downstream*, refino e petroquímica (Pinho *et al.*, 2014), ainda que não façam menção direta à relevância dos equipamentos de produção submarina em sua análise.

Outra tendência identificada nessa função diz respeito às diferentes estratégias de gestão do conhecimento dos atores. Primeiro, destaca-se que a ausência de atores que mais publicaram conhecimentos científicos no *ranking* de patenteamento pode ser explicada, em parte, pela importância dada às patentes como mecanismo de propriedade intelectual, considerando que muitos atores da IPGN preferem manter seus conhecimentos em segredo industrial (Pinho *et al.*, 2014).

### 4.3 Difusão dos conhecimentos

As plataformas de difusão de conhecimentos em tecnologias de processamento submarino são os eventos do setor do petróleo que reúnem membros da indústria e da pesquisa acadêmica em espaços de divulgação de informações e resultados de projetos industriais. Nesses eventos, discu-

tem-se desafios do setor petrolífero, bem como as estratégias de solução de problemas e desenvolvimento das atividades da indústria. Os eventos facilitam a formação de redes informais e a coalizção de interesses sobre uma determinada tecnologia.

A complexidade da emergência de uma nova tecnologia envolve custos e apresenta barreiras à inovação que demandam interação entre atores de diferentes naturezas como condição necessária ao avanço da base de conhecimentos. Essas interações estruturam redes de colaboração/cooperação. No caso do processamento submarino, essa função demonstra que as interações entre usuários e fornecedores dessas tecnologias são as mais frequentes nas redes de inovação, tanto na dimensão da pesquisa (publicações), quanto no desenvolvimento (patentes de invenção) e demonstração (projetos demonstrativos). Embora as interações do tipo universidade-empresa sejam menos frequentes nas redes de inovação, é através dessas redes que as companhias de petróleo e empresas fornecedoras acessam novos conhecimentos, realizam transferência tecnológica da comunidade acadêmica para o setor industrial e identificam soluções tecnológicas potenciais. Esses resultados corroboram a compreensão de que a pesquisa acadêmica é complementar à corporativa.

A maior intensidade de interação dos atores nas redes de inovação em processamento submarino ocorre na dimensão da pesquisa (ver Figura 5). A expansão das redes de colaboração científica sugere aumento do ritmo de desenvolvimento da tecnologia. A análise das redes de colaboração científica indica como alguns atores da IPGN conseguiram desenvolver competências em tecnologias de processamento submarino que os emparelhassem em relação a seus concorrentes. Nesse sentido, o exemplo da Petrobras é ilustrativo à medida que a companhia de petróleo brasileira começou a participar das redes de colaboração científica na década de 2000 e assumiu, ao fim de 2010, uma posição de centralidade na rede. A Schlumberger apresenta uma trajetória semelhante no mesmo período.

Ao contrário da dimensão de pesquisa, a cooperação tecnológica (ver Figura 6) em nível de propriedade intelectual compartilhada entre os atores é muito pequena. A estrutura industrial da IPGN reforça esse resultado considerando que ela atua como freio à colaboração no nível da apropriação dos conhecimentos protegidos em segredo industrial. As estruturas de rede de cotitularidade de patentes estão limitadas a interações interorganizacionais entre atores chineses, sugerindo a existência de interesses de

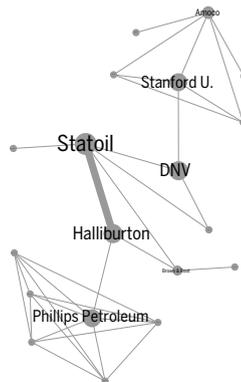
companhias de petróleo do país asiático em estabelecer uma estratégia de inovação colaborativa com fornecedores e universidades locais, isto é, desenvolver capacidades tecnológicas endógenas, visando identificar e se apropriar dos conhecimentos em tecnologias emergentes na indústria chinesa do petróleo *offshore*.

Além disso, uma característica do padrão concorrencial da indústria para-petrolífera, a saber, a dinâmica de fusão e aquisição dos fornecedores, é responsável pela difusão dos conhecimentos entre atores que passaram a dedicar-se a atividades de inovação em processamento submarino ao fundir-se ou adquirir uma empresa.

Finalmente, as transformações nas redes de clientes-fornecedores nos projetos demonstrativos de tecnologias de processamento submarino (ver Figura 7) refletem aspectos do processo de transferência de atividades inovativas às fornecedoras da IPGN, iniciado na década de 1980. A análise dessas redes evidencia que as fornecedoras passam a exercer governança sobre a transmissão dos conhecimentos na rede ao posicionarem-se estrategicamente, enquanto as companhias de petróleo se tornam clientes, assumindo posições periféricas em relação às suas fornecedoras à medida que a rede evolui.

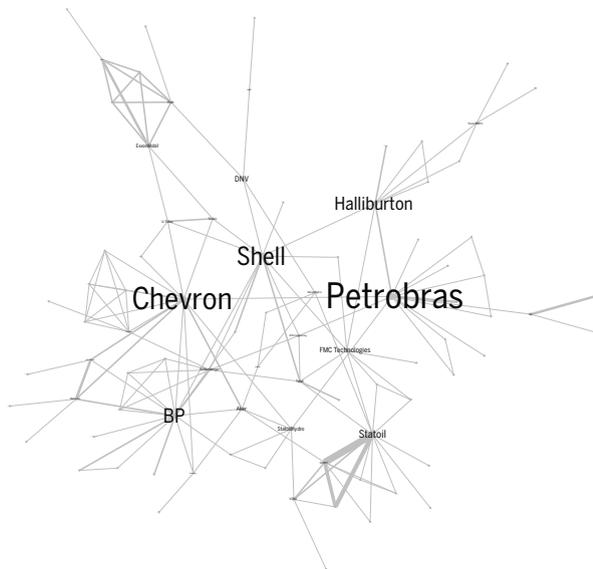
Figura 5 **Evolução das redes de colaboração científica em processamento submarino (1990-2019)**

Figura 5a **Topografia da rede de colaboração científica em processamento submarino (1990-1999)**



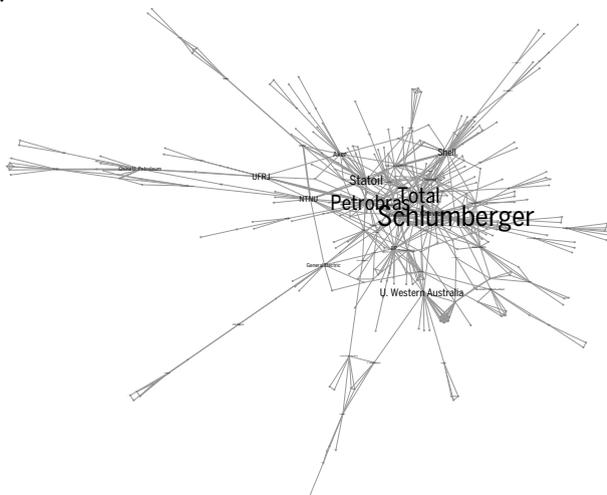
Fonte: *Elaboração própria a partir dos dados de Scopus, 2019. Nota: Apenas o componente gigante da rede está visível (41,3% dos nós e 54,1% das arestas).*

Figura 5b **Topografia da rede de colaboração científica em processamento submarino (2000-2009)**



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Scopus, 2019. Nota: Apenas o componente gigante da rede está visível (62,04% dos nós e 72,9% das arestas).

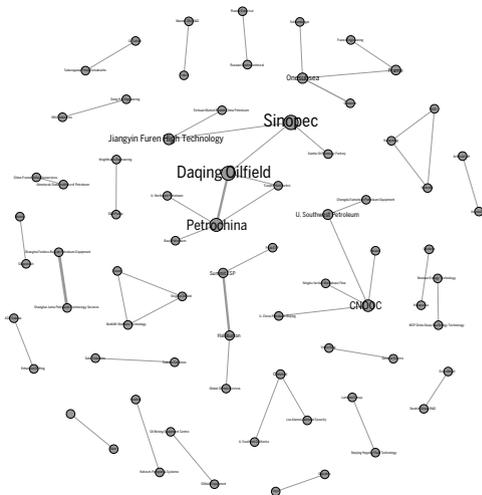
Figura 5c **Topografia da rede de colaboração científica em processamento submarino (2010-2019)**



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Scopus, 2019. Nota: Apenas o componente gigante da rede está visível (68,38% dos nós e 82,59% das arestas).



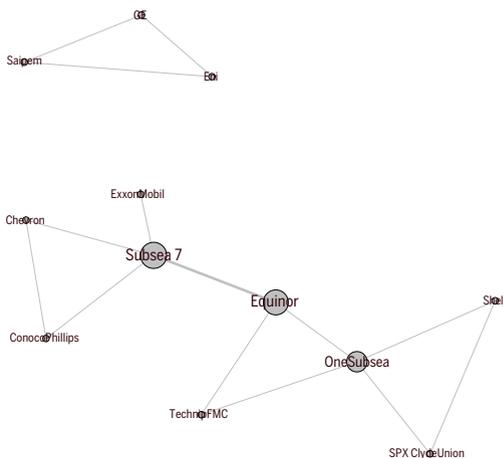
Figura 6c **Topografia das redes de cooperação tecnológica em processamento submarino (2010-2019)**



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Derwent Innovation Index, 2019.

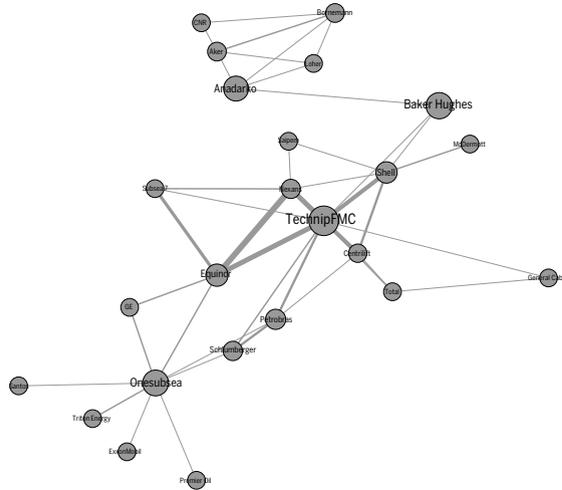
Figura 7 **Evolução das redes de clientes-fornecedores nos projetos demonstrativos em processamento submarino (1990-2019)**

Figura 7a **Topografia das redes de clientes-fornecedores em projetos demonstrativos em processamento submarino (1990-1999)**



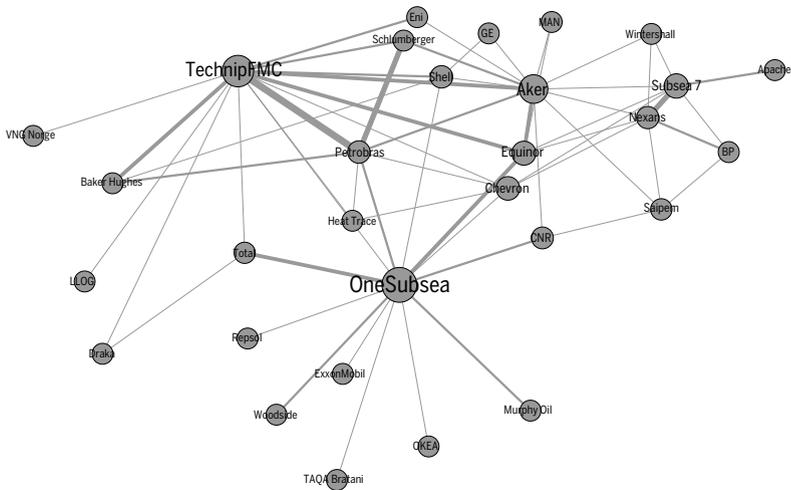
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Offshore Magazine, 2019a; 2019b.

Figura 7b **Topografia das redes de clientes-fornecedores em projetos demonstrativos em processamento submarino (2000-2009)**



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Offshore Magazine, 2019a; 2019b. Nota: Apenas o componente gigante da rede está visível (92,31% dos nós e 97,62% das arestas).

Figura 7c **Topografia das redes de clientes-fornecedores em projetos demonstrativos em processamento submarino (2010-2019)**



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de Offshore Magazine, 2019a; 2019b. Nota: Apenas o componente gigante da rede está visível (90,91% dos nós e 95,24% das arestas).

#### 4.4 Orientação da busca

O avanço da fronteira exploratória da E&P *offshore* em águas profundas apresenta problemas específicos de naturezas distintas a depender das características da província exploratória que determinam o direcionamento do projeto de E&P e as soluções tecnológicas para os desafios identificados. Nesse sentido, ocorre um complexo processo de escolha que considera o alinhamento de suas estratégias tecnológicas às suas expectativas de obtenção de lucro. À medida que uma nova tecnologia é dominada, os atores passam a selecioná-la como uma alternativa tecnológica considerada “vencedora”, sedimentando sua trajetória tecnológica.

No caso das tecnologias de processamento submarino, cada subsistema apresenta direções particulares de desenvolvimento tecnológico. O caso do BES ilustra a competição de trajetórias tecnológicas baseadas em diferentes modelos de bombas. De acordo com os dados referentes aos projetos demonstrativos, o bombeio multifásico baseado em bombas elétricas submersíveis apresenta uma trajetória “vencedora” na E&P do *offshore* profundo.

A conformação dessas trajetórias tecnológicas dominantes depende da coordenação de esforços inovativos de atores públicos e privados. Em todo o cenário global, países desenvolvidos e em desenvolvimento têm reconhecido o papel do conhecimento no aumento de sua competitividade, implementando instrumentos de política científica, tecnológica e de inovação a fim de elevar os dispêndios em P&D (Souza, 2019). Somente no ano de 2017, os subsídios mundiais à IPGN representaram 6,5% do PIB global (FMI, 2019). No caso do setor petrolífero brasileiro, por exemplo, as cláusulas de P&D da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é um dos principais instrumentos de apoio às atividades de pesquisa e inovação, tendo efeito direto na base de conhecimento da indústria nacional do petróleo e gás natural, seja pela P&D, seja pela identificação e experimentação de tecnologias de fronteira nos campos petrolíferos brasileiros.

A aceleração da produção de novos conhecimentos em tecnologias de processamento submarino não só reflete os resultados da coordenação desses esforços inovativos e do apoio à P&D no setor petrolífero, mas também tem surtido efeito positivo na geração de expectativas. Entretanto, identifica-se uma mudança qualitativa sobre seu impacto proeminente no imaginário dos atores da indústria. Inicialmente, as expectativas em relação ao processamento submarino vislumbravam a descontinuidade do uso de

plataformas de produção, inaugurando uma mudança de paradigma tecnológico no setor (Albuquerque *et al.*, 2013; Bai; Bai, 2018). Apesar do impulso ao desenvolvimento dessas tecnologias no período recente, os desafios tecnoeconômicos e gargalos tecnológicos relacionados à eletrificação de sistemas submersíveis põem em dúvida em que medida as transformações no STI influenciam a consolidação do processamento submarino como um sistema dominante em médio prazo na IPGN.

Essa função indica que o processamento submarino está acoplado ao sistema tecnológico dominante,<sup>11</sup> ou seja, caracteriza-se como um sistema complementar. Os efeitos da experimentação e do processo de aprendizado com essas tecnologias podem aprimorar seu nível de competitividade, engendrando um processo de transição tecnológica do setor de E&P *offshore* da IPGN orientado para a substituição das plataformas por sistemas submarinos de produção.

#### 4.5 Formação de mercado

As tecnologias de processamento submarino são aplicadas em diferentes mercados-nicho na IPGN. Estes são espaços privilegiados que protegem uma nova tecnologia dos mecanismos de seleção do mercado e da competição com sistemas tecnológicos dominantes (Schot; Geels, 2007). A Tabela 7 sugere que os mercados estratégicos para o processamento submarino são aqueles que possuem um segmento de E&P consolidado (Mar do Norte, Golfo do México e litoral brasileiro) ou emergente (Golfo da Guiné, costa australiana, Mar da China). Esse resultado corrobora as conclusões de estudos que indicam que as atividades de E&P com maior potencial residem em águas (ultra)profundas nas regiões atlânticas, pré-sal e círculo ártico (Zhang *et al.*, 2019).

Por sua vez, a Tabela 8 indica quais são os mercados-nicho para cada subsistema de processamento submarino. O Mar do Norte, caracterizado

11 A história da conformação da trajetória tecnológica dos sistemas de produção flutuantes (SPFs) é um paralelo ao caso dos SPS. A partir da década de 1970, plataformas semisubmersíveis começaram a ser adotadas como sistemas de produção antecipada em regiões exploratórias que inviabilizavam economicamente o emprego de plataformas fixas 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 SPFs.

por grandes reservas de gás natural e baixas temperaturas, é o principal mercado-nicho para as tecnologias de TRI, CSG e AA. As regiões de águas profundas e ultraprofundas como o Brasil, Golfo do México e Golfo da Guiné são mercados-nicho para o BES.

**Tabela 7** Projetos demonstrativos em tecnologias de processamento submarino por província exploratória (1990-2019)

Região	Nº de projetos implementados			
	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, 2019a; 2019b.

**Tabela 8** Distribuição geográfica dos projetos demonstrativos em processamento submarino, por subsistema (1990-2019)

Região	Subsistemas de processamento submarino				
	CSG	BES	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, 2019a; 2019b.

Essa função caracteriza o papel dos mercados-nicho para o desenvolvimento do processamento submarino. A emergência dessas tecnologias ilustra um caso em que atores incumbentes são os responsáveis pela abertura de espaço a novas tecnologias em mercados já estabelecidos, ao contrário do

que se observa com as energias renováveis. Os principais mercados para essas tecnologias são as seguintes regiões *offshore*: Mar do Norte, litoral brasileiro e Golfo do México. Outros mercados emergentes para essas tecnologias são a Austrália, Rússia e Canadá, bem como a China.

#### 4.6 Criação de legitimidade

Apesar de não existir uma opinião pública formada sobre as tecnologias de processamento submarino, as forças contrárias à sua emergência são os grupos que advogam a favor da transição dos sistemas energéticos incumbentes em direção às energias renováveis. O reconhecimento da contribuição da IPGN para as mudanças climáticas criou forças de resistência e pressão acerca da continuidade das atividades dessa indústria.

Além disso, os riscos associados às tecnologias submarinas podem comprometer futuros projetos *offshore* e, até mesmo, o processo de inovação dessas tecnologias se se consideram os efeitos do acidente da Deep Horizon (2010) na reorientação dos investimentos de exploração de petróleos não convencionais no setor petrolífero estadunidense (IEA, 2019) na última década. Entretanto, os apoios financeiros a essa indústria apresentam tendência de crescimento no período recente (FMI, 2019). Nesse sentido, apesar da ausência de apoio de parcela da sociedade civil, a IPGN tem investido em novos projetos de E&P *offshore*, que sinalizam o desenvolvimento e a adoção de novas tecnologias.

### 5 A emergência das tecnologias de processamento submarino na IPGN: uma interpretação à luz da evolução do STI

Através da análise das funções, foi possível caracterizar os principais componentes do STI entre 1990-2019 (ver Tabela 9). De acordo com os aspectos destacados na dinâmica do sistema de inovação, é sugerida uma interpretação acerca das interações observadas entre as funções e o processo de emergência tecnológica do STI global em processamento submarino de petróleo e gás natural.

Tabela 9 **Caracterização dos principais componentes do STI em processamento submarino (1990-2019)**

<b>Componente</b>	<b>Características</b>
<b>Tecnologia</b>	“Marinização” e eletrificação dos sistemas submarinos de produção; ganhos de confiabilidade e capacidade operacional em águas profundas e ultraprofundas.
<b>Atores e redes</b>	Dominância de atores incumbentes (grandes companhias de petróleo e suas fornecedoras); baixa participação de universidades e outras organizações de pesquisa; primazia das interações do tipo usuário-fornecedor.
<b>Políticas e instituições</b>	Apoio público à P&D e outros instrumentos de investimento à inovação; carência de programas tecnológicos específicos à promoção do processamento submarino.
<b>Desempenho do sistema</b>	A atividade experimental e a produção e difusão de conhecimentos nas redes de inovação geram efeitos positivos para a emergência tecnológica do processamento submarino. A introdução dessas novas tecnologias em mercados-nicho estabelecidos pela própria IPGN reflete o interesse desses atores em acoplar esse conjunto de tecnologias emergentes aos sistemas de produção dominantes a fim de desenvolvê-las e buscar aplicações em projetos futuros na fronteira exploratória do setor. Apesar da contestação das atividades dessa indústria por setores da sociedade civil, a mobilização de recursos governamentais que incentivam investimentos em novas tecnologias e projetos de E&P no <i>subsea</i> demonstra que a IPGN tem superado resistências à mudança tecnológica.
<b>Contexto</b>	O imperativo de combate às mudanças climáticas é desfavorável à expansão das atividades da IPGN. Todavia, considerando a perspectiva de continuidade da petrodependência da matriz energética mundial, até meados do presente século, projeta-se a emergência de novas soluções tecnológicas capazes de aumentar a eficiência produtiva desses recursos energéticos.

Fonte: *Elaboração própria, 2021.*

A intensidade de produção e difusão de conhecimentos associados à dinâmica da atividade experimental são as funções que mais impulsionaram a emergência das tecnologias de processamento submarino, ao longo do período analisado. Particularmente, a atividade experimental atua positivamente para a demonstração e socialização dos resultados e experiências acerca dessas tecnologias emergentes nas redes formais e informais de inovação na IPGN.

A orientação da busca tem sido importante para a articulação de expectativas positivas e a conformação de trajetórias tecnológicas para os subsistemas de processamento submarino que competem entre si (por exemplo, os diferentes modelos de bombas submarinas) e com os demais sistemas de produção dominantes. A coordenação de esforços entre atores públicos e privados tem sido positiva para a dinâmica de formação de mercado e

demonstração dessas novas tecnologias. As estratégias de abertura de nichos tecnológicos para tecnologias de processamento submarino têm sido orientadas a mercados estabelecidos.

Não há uma opinião pública formada acerca dos usos de tecnologias de processamento submarino. No contexto de combate às mudanças climáticas e urgência da transformação em direção à sustentabilidade, a expansão da E&P *offshore* enfrenta dificuldades para criar legitimidade em alguns setores da sociedade civil. Entretanto, espera-se que os combustíveis fósseis se mantenham como uma importante fonte de energia ao longo do século XXI, demandando o desenvolvimento de soluções tecnológicas alinhadas às estratégias de mitigação de emissões da IPGN. Outras pressões relacionadas aos riscos ambientais associadas à E&P *offshore* têm sido levantadas após o episódio do vazamento de petróleo no Golfo do México, em 2010. Entretanto, os investimentos globais em combustíveis fósseis, particularmente petróleo e gás natural têm apresentado uma tendência crescente no período recente (FMI, 2019).

A evolução do STI influenciou diretamente o processo de emergência das tecnologias de processamento submarino. Entretanto, seus efeitos são diferentes no direcionamento das trajetórias tecnológicas para cada subsistema analisado. A Tabela 10 qualifica os subsistemas AA e BES como tecnologias emergentes em fase de emergência. Por sua vez, os subsistemas de CSG, TRI e SS são qualificados como tecnologias em fase de pré-emergência.

O AA é uma tecnologia de baixo impacto no paradigma tecnológico da IPGN, caracterizada por baixos níveis de novidade radical e incertezas, que logrou consolidar um desenho dominante (coerência), facilitando seu acoplamento às linhas de escoamento da produção. Por sua vez, a abertura de novas fronteiras exploratórias em águas (ultra)profundas nos anos 2000 e o imperativo da eficiência produtiva dos projetos de E&P, visando aprimorar a recuperação avançada de petróleo e gás natural, tem tido efeito positivo na aceleração do desenvolvimento do BES. Essa tecnologia emergente tem se consolidado como uma solução tecnológica de alto impacto na IPGN. A competição entre distintos modelos de bombas submarinas sugere que os níveis de novidade radical afetam sua coerência, alimentando incertezas acerca da sua performance tecnológica.

Finalmente, os subsistemas CSG, SS e TRI apresentam atributos de tecnologias emergentes em fase de pré-emergência. As dificuldades do processo de “marinização” dos SS e TRI são explicadas pelos altos níveis de

incoerência no desenho tecnológico e por incertezas sobre seus níveis de desempenho e segurança operacional. Os altos índices de novidade radical influenciam as expectativas de alto impacto proeminente no que diz respeito a esses três subsistemas. Conseqüentemente, criam-se expectativas acerca da aceleração do desenvolvimento desses subsistemas em médio prazo.

Tabela 10 **Atributos de tecnologias emergentes dos subsistemas de processamento submarino de petróleo e gás natural**

Atributos	Subsistemas				
	AA	CSG	BES	SS	TRI
Novidade radical	Pouca	Considerável	Considerável	Considerável	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 ambigüidade	Baixo	Médio	Médio	Alto	Alto

Fonte: *Elaboração própria, 2021.*

## 6 Considerações finais

O presente artigo demonstrou que as funções do STI analisadas neste artigo surtiram efeitos positivos no processo de emergência de tecnologias de processamento submarino, entre 1990-2019.

O crescimento da atividade empreendedora experimental foi imprescindível para a formação de mercados-nicho para as tecnologias de processamento submarino em províncias exploratórias com alto potencial de E&P *offshore*. O aprendizado tecnológico decorrente das atividades de experimentação tem corroborado a formação de redes, particularmente entre usuários e fornecedores com influência positiva para a produção de novos conhecimentos. O ritmo crescente da produção de novos conhecimentos em processamento submarino em colaboração científica e tecnológica, ao longo do período analisado, sugere um adensamento das interações entre os atores do STI, particularmente companhias de petróleo e suas forne-

cedoras. As universidades e organizações de pesquisa teriam um caráter complementar à pesquisa corporativa.

A orientação da busca tem sido positiva para a geração de expectativas tecnológicas nos atores envolvidos com o processamento submarino que, por sua vez, inauguram trajetórias tecnológicas distintas para cada um dos subsistemas analisados. Essa característica explica, em partes, o porquê de alguns subsistemas (BES e AA) apresentarem trajetórias mais maduras em relação aos demais. Além disso, essa função evidencia uma coordenação entre atores públicos e privados que mobilizam recursos para a IPGN, reconhecendo o valor estratégico do conhecimento para a competitividade de seus setores petrolíferos. Dessa maneira, a atividade empreendedora é incentivada a identificar oportunidades econômicas associadas a tecnologias emergentes na fronteira do conhecimento da IPGN. Por fim, os resultados da orientação da busca indicam que, apesar das pressões contrárias à expansão da E&P de petróleo e gás, os investimentos governamentais e a elaboração de políticas de incentivo à pesquisa e inovação corroboram certo grau de legitimidade para a implementação de novos projetos tecnológicos na IPGN no presente.

As mudanças na relação entre o STI e seu contexto também influenciaram o processo de emergência do processamento submarino na IPGN. As incertezas relacionadas à complexidade e impacto dessas emergentes no paradigma tecnológico da E&P *offshore* explicam o porquê de sua emergência estar aquém das expectativas iniciais. Atualmente, o processamento submarino representa um conjunto de sistemas complementares àqueles dispostos nos deques das plataformas de produção. Essas tecnologias emergentes têm passado pelo processo de marinização e eletrificação, visando atender as demandas da expansão da IPGN em águas cada vez mais profundas. A análise das funções do STI indica que os subsistemas de AA e BES estão em fase de emergência, enquanto CSG, TRI e SS assumem características de tecnologias em fase de pré-emergência.

O caso das tecnologias de processamento submarino demonstra como o processo de emergência de uma nova tecnologia é afetado na etapa de formação de um STI. A presente análise das funções do STI e dinâmica de emergência de tecnologias emergentes contribui ao apresentar resultados que sugerem que países em desenvolvimento podem assumir posições estratégicas na geração e governança do processo de inovação de uma nova tecnologia com alto valor estratégico na fronteira do conhecimento.

Dessa maneira, é mister às políticas científicas, tecnológicas e de inovação identificar e articular competências do sistema produtivo para o aproveitamento de oportunidade em áreas tecnológicas emergentes. A história dos programas tecnológicos para o desenvolvimento de sistemas de produção em águas profundas no Brasil pode ser guia de como políticas públicas explícitas podem orientar o processo de inovação e capacitação tecnológica, através do aprendizado tecnológico (Freitas; Furtado, 2004).

## Referências

- ALBUQUERQUE, F. A.; VIANNA, F. L. V.; ALVES, R. P.; KUCHPIL, C.; MORAIS, M. G. G.; ORLOWSKI, R. T. C.; MORAES, C. A. C.; RIBEIRO, O. *Subsea processing systems: Future visions*. Proceedings of Offshore Technology Conference, 2013.
- AUTIO, E.; HAMERI, A. The structure and dynamics of technological systems: a conceptual model. *Technology & Society*, v. 17, n. 4, p. 365-384, 1995.
- BAI, Q.; BAI, Y. *Subsea engineering handbook*. 2. ed. Burlington/Oxford: Gulf Professional Publishing, 2018.
- BARLOW, J. Innovation and learning in complex offshore construction projects. *Research Policy*, v. 29, n. 07, p. 973-989, 2000.
- BERGEK, A.; JACOBSSON, S.; CARLSSON, B.; LINDMARK, S.; RICKNE, A. Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. *Research Policy*, v. 37, p. 407-429, 2008.
- BERGEK, A.; HEKKERT, M.; JACOBSSON, S.; MARKARD, J.; SANDÉN, B.; TRUFFER, B. Technological innovation systems in contexts: Conceptualizing contextual structures and interaction dynamics. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, v. 16, p. 51-64, 2015.
- BP. *BP Energy outlook 2019*. 2019.
- BP. *BP Statistical Review 2014*. 2014.
- CARLSSON, B. *Technological systems and industrial dynamics*. New York: Springer US, 1997.
- CARLSSON, B.; STANKIEWICZ, R. On the nature, function and composition of technological systems. *Journal of Evolutionary Economics*, v. 01, n. 2, p. 93-118, 1991.
- EIA. *Offshore oil production in deepwater and ultra-deepwater is increasing*. 2016a.
- EIA. *Offshore production nearly 30% of global crude oil output in 2015*. 2016b.
- FMI. *Global fossil fuel subsidies remain large: An update based on Country-level estimates*. 2019.
- FREITAS, A. G.; FURTADO, A. T. Nacionalismo e aprendizagem no Programa de Águas Profundas da Petrobras. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 3, n. 1, p. 55-86, 2004.
- FURTADO, A. T. The French system of innovation in the oil industry: some lessons about the role of public policies and sectoral patterns of technological change in innovation networking. *Research Policy*, v. 25, n. 8, p. 1.243-1.259.

- FURTADO, A. T.; FREITAS, A. G. The catch-up strategy of Petrobras through cooperative R&D. *The Journal of Technological Transfer*, v. 25, p. 23-36, 2000.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. *Revista USP*, v. 72, p. 6-15, 2007.
- HAMMET, D. S.; LUKE, J. M. *Success and failure: subsea completion*. Proceedings of Offshore Technology Conference, 1986.
- HEKKERT, M.; SUURS, R. A. A.; NEGRO, S. O.; KUHLMANN, S.; SMITS, R. Functions of innovation systems: a new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 74, n. 4, p. 413-432, 2007.
- IEA. *World Energy Outlook 2018*. 2019.
- IEA. *World Energy Investment 2019*. 2019.
- IEA. *World Energy Outlook 2020*. 2020. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf>.
- 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, 2004.
- JONES, J. W. *Subsea production system: Trends in the nineties*. Proceedings of Offshore Technology Conference, 1995.
- LEGEAY, J.; HAZEL, T.; PEREGRYM, G. *Powering subsea processing facilities of the future*. Proceedings of Offshore Technology Conference, 2013.
- MARKARD, J. The life cycle of Technological Innovation Systems. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 153, 119407, 2020.
- MÖED, H. F.; GLÄNZEL, W.; SCHMOCH, U. *Handbook of Quantitative Science and Technology Research*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005.
- OFFSHORE MAGAZINE. *All-electric subsea systems deliver intelligence on demand*. 2018.
- OFFSHORE MAGAZINE. *2019 Worldwide survey of active heating*. 2019a.
- OFFSHORE MAGAZINE. *2019 Worldwide survey of subsea processing*. 2019b.
- PINHO, A.; REGUEIRA, K.; SOUZA, E. *Portfólio de patentes das 10 maiores empresas de energia do mundo*. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 2014. *Anais...* 2014.
- RIBEIRO, C. G.; JÚNIOR, E. I.; LI, Y.; FURTADO, A. T.; GARDIM, N. 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. 1.827-1.843, 2015.
- RUAS, J. A. G. *Dinâmica de concorrência na indústria para-petrolífera offshore: evolução mundial do setor de equipamentos subsea e o caso brasileiro*. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.
- SCHOT, J.; GEELS, F. W. Niches in evolutionary theories of technological change: A critical survey of the literature. *Journal of Evolutionary Economics*, v. 17, p. 605-622, 2007.
- SOUZA, E. R. *Políticas públicas de CT&I e o Estado brasileiro*. Salvador: IFBA, p. 28-89, 2019.

STRATEGY&. *The global innovation 1000 study*. 2019.

SUURS, R. A. A.; HEKKERT, M. P. Cumulative causation in the formation of a technological innovation system: The case of biofuels in the Netherlands. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 76, n. 8, p. 1.003-1.020, 2009.

ZHANG, G.; QU, H.; CHEN, G.; ZHAO, C.; ZHANG, F.; YANG, H.; ZHAO, Z.; MA, M. 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, 2019.

## Sobre os autores

*Matheus Gonçalves da Silva Pereta – matheuspereta@ige.unicamp.br*

Departamento de Política Científica e Tecnológica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9148-9467>.

*André Tosi Furtado – furtado@ige.unicamp.br*

Departamento de Política Científica e Tecnológica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6183-192X>.

*Janaína Oliveira Pamplona da Costa – jpcosta@unicamp.br*

Departamento de Política Científica e Tecnológica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7429-3438>.

## Agradecimentos

Este artigo é resultado de muitas interações durante os anos de pesquisa de iniciação científica e mestrado. Agradecemos a todos que contribuíram intelectualmente, em particular aos revisores, que forneceram importantes críticas e sugestões. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## Contribuições dos autores

Matheus Gonçalves da Silva Pereta: coleta de dados, análise de dados, escrita do texto.  
André Tosi Furtado: supervisão do trabalho, revisão do texto.  
Janaína Oliveira Pamplona da Costa: supervisão do trabalho, revisão do texto.

## Sobre o artigo

Recebido em 20 de maio de 2021. Aprovado em 01 de dezembro de 2021.