

1 INTRODUÇÃO

Os estudos que tratam da evolução das inovações tecnológicas na produção de petróleo no mar (*offshore*) evidenciam as complexidades envolvidas na geração e na aplicação de tecnologias na atividade. Os esforços em pesquisa e desenvolvimento (P&D) voltados ao desenvolvimento de equipamentos e sistemas para a produção de petróleo em águas profundas requerem o concurso de extensa variedade de disciplinas, muito além das empregadas no desenvolvimento de inovações de máquinas e processos em geral. São os casos das ciências náuticas, especialmente por meio do emprego de *softwares* avançados e de grandes tanques de provas para avaliações do comportamento de estruturas navais em simulações das condições ambientais em alto mar; das ciências meteorológicas; da robótica, para o desenvolvimento de veículos de operação remota; de cálculos dos efeitos das pressões hidrostáticas sobre os equipamentos e dutos, entre outras disciplinas e ciências. Igualmente, a fase final das atividades de P&D – as experimentações de protótipos em campo – ocorre em complexas condições de instalação, controles operacionais e observação, que intensificam as dificuldades dos desenvolvimentos tecnológicos em equipamentos e sistemas para a produção de petróleo *offshore*.

As complexidades na produção de petróleo em novas fronteiras marítimas induzem as empresas petrolíferas a adotarem atitudes e ações cooperativas, por meio de esforços conjuntos de P&D. Desse modo, formam-se redes de pesquisas com objetivo de obter novos ou aprimorados meios de produção para as atividades do segmento, envolvendo universidades, instituições de pesquisas e empresas parapetroleiras fabricantes de equipamentos. Nos processos históricos de evolução de sistemas, equipamentos e novos serviços requeridos na extração/produção em águas cada vez mais profundas, em diversas regiões no mundo, as empresas petrolíferas criaram seus próprios centros de P&D e se associaram a instituições e empresas detentoras de capacitação e conhecimentos para o desenvolvimento de inovações para o segmento. Para a exploração do pré-sal brasileiro, a Petrobras formou dezenas de redes temáticas com universidades e centros de pesquisa para o desenvolvimento de cerca de 50 temas estratégicos relativos à exploração e à produção de petróleo e gás natural.

A associação entre agentes empresariais e científicos originou, ao longo de 80 anos de desenvolvimentos tecnológicos na produção de petróleo no mar (1930-2010), inovações radicais essenciais ao avanço em águas profundas e ultraprofundas. São os casos de árvores de natal submarinas (árvores de válvulas), de sistemas de separação de hidrocarbonetos e de bombeamentos submarinos, do desenvolvimento de risers (dutos) flexíveis, entre outras. São efetivados, ainda, processos contínuos de inovações incrementais, por meio de adaptações e aprimoramentos em equipamentos e sistemas de extração e produção, com vistas a viabilizar a extração e a produção em novos locais, solucionar problemas técnicos e reduzir os altos gastos com os investimentos e os custos operacionais.¹

Dadas a complexidade e a variedade dos processos de P&D e de inovações tecnológicas na produção de petróleo no mar, para o melhor entendimento de seus fundamentos e de sua importância, torna-se necessário avançar em uma sistematização que faça a conexão entre, por um lado, os ambientes ou condições físicas em que se efetivam a produção e, por outro, as inovações empreendidas. Uma categorização dos principais

* Este artigo é um excerto do livro "Produção de Petróleo em Águas Profundas: uma história tecnológica da Petrobras", do autor, a ser publicado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) e Petrobras. O autor agradece as leituras e sugestões de Ricardo Bielschowsky, da Cepal/Brasília, Bruno César de Araújo e João Maria de Oliveira, ambos do Ipea, lembrando que eventuais erros remanescentes no texto são de sua exclusiva responsabilidade.

** Técnico de Planejamento e Pesquisa da Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais, de Inovação, Regulação e Infraestrutura (Diset) do Ipea.

1. Nos processos de desenvolvimento tecnológico, algumas inovações são caracterizadas por mudanças radicais, enquanto outras realizam mudanças menores, incrementais (OCDE, 1997/2004, p. 47, parágrafo 106). Segundo Schumpeter, inovações radicais engendram rupturas mais intensas, enquanto inovações incrementais dão continuidade aos processos de mudanças nas atividades produtivas (OCDE, 1997/2004, p. 36, parágrafo 76).

desafios que caracterizam a produção de petróleo no mar pode tornar mais transparente o conhecimento sobre os processos de indução de tecnologias nas atividades petrolíferas, complementando os estudos usuais sobre o tema, direcionados para descrições e análises das inovações em equipamentos e sistemas.

2 DESAFIOS TECNOLÓGICOS NA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO *OFFSHORE*

Algumas características das atividades de petróleo *offshore* mostram – pelos desafios tecnológicos que geram – que não é possível o avanço na produção em águas profundas, assim como na exploração,² sem a permanente conquista de novos conhecimentos tecnológicos e inovações. Este ponto deve ser enfatizado, em razão da posição singular que as inovações ocupam na produção de petróleo, tipificadas como *inovações de processo*.³

Nas atividades econômicas em geral, os objetivos buscados com inovações de processo – por meio da adoção de método de produção ou de distribuição novo ou significativamente melhorado nas operações da empresa – podem ser sintetizados como: aumentos de produtividade, redução de custos de produção, aperfeiçoamentos na distribuição de produtos e/ou serviços, automatização de processos produtivos, melhora das condições de trabalho, entre outros. Nas atividades petrolíferas em águas profundas, as inovações de processo representam, além dos efeitos citados, uma condição *sine qua non* para se iniciar a produção em campos de petróleo situados em águas mais profundas ou em novos ambientes geológicos. Foi o que ocorreu no desenvolvimento dos campos de petróleo no Golfo do México, a partir da década de 1930; no Mar do Norte, a partir dos anos 1960; e na bacia de Campos, a partir da segunda metade da década de 1970, acompanhando a escalada das descobertas em águas crescentemente profundas e em condições ambientais mais complexas; o mesmo processo vem ocorrendo no início da produção de hidrocarbonetos na camada geológica do pré-sal, em razão dos novos desafios tecnológicos que apresenta.

A indissociabilidade entre inovações de processo e avanços da produção de petróleo no mar deriva de três especificidades ou características da produção marítima de petróleo que diferenciam fortemente a atividade dos demais setores econômicos, incluindo o segmento de produção de petróleo em terra. As especificidades, que resultam em alto grau de dificuldades técnicas, são: *i*) as condições prevalentes no ambiente marinho, no clima e nas rochas abaixo do leito oceânico; *ii*) as grandes distâncias entre as plataformas de produção na superfície do mar e os poços de extração de petróleo no fundo do oceano, e entre as plataformas e as costas marítimas; e *iii*) a invisibilidade das operações no mar.

A combinação das três características, que representam, em grandes linhas, as condições físicas e ambientais presentes na produção de petróleo no mar, torna os requisitos de inovações de processo, de composição de equipamentos e de procedimentos operacionais nas atividades petrolíferas no mar, absolutamente, únicos na história do desenvolvimento da moderna tecnologia.⁴ Para cada uma das três condições, que ocorrem conjuntamente, podem ser identificados os desafios específicos e as inovações requeridas, como se analisa a seguir.

2. A exploração de petróleo, isto é, a pesquisa de locais favoráveis à existência de hidrocarbonetos, envolve três fases: prospecções, por meio do uso de métodos geológicos, geofísicos e sísmicos, entre outros, para estudar as estruturas do subsolo; perfurações, para verificar a existência de acumulações de hidrocarbonetos; e avaliação de formações, para verificar o potencial de produção de uma jazida de petróleo (Thomas, 2004).

3. Nas atividades de produção de petróleo desenvolvidas por empresas petrolíferas, as inovações constituem-se em *inovações de processo*, uma vez que seu foco são as melhorias na extração/produção/transporte de petróleo e gás natural e, não, a obtenção de um produto novo ou aprimorado. Na cadeia do petróleo, *inovações de produto* ocorrem, por exemplo, no segmento de produção de derivados, por meio da introdução de produtos novos ou significativamente melhorados no mercado, como no caso do desenvolvimento de um combustível com maior rendimento energético.

4. Uma atividade científica que se aproxima da exploração de petróleo, no que se refere às condições físicas ambientais em que ocorrem as operações, é a exploração aeroespacial. Como no caso da exploração *offshore* de petróleo, a operacionalização dos equipamentos enviados ao espaço exterior, isto é, os satélites e aeronaves não tripuladas, é também efetivada em meio ambiente regido por leis físicas completamente diferentes das existentes na Terra, assim como a longas distâncias e sob condições de invisibilidade direta para os controladores na Terra. Não obstante não se constituir ainda em atividade econômica quanto a seus fins, a atividade aeroespacial gera um grande número de desenvolvimentos em diversas fronteiras tecnológicas, que são estendidas ou aplicadas como inovações de produto e/ou de processo em segmentos econômicos variados (observação de Marcelo Salum, diplomata Conselheiro do Ministério das Relações Exteriores, nov./2011).

2.1 Condições prevalecentes no ambiente marinho, no clima e nas rochas

Fatores como a velocidade dos ventos, a altura das ondas, as direções das correntes marinhas, as baixas temperaturas no mar, as tempestades, as pressões hidrostáticas decorrentes da coluna de água, a composição das rochas-reservatório abaixo do solo marinho, a natureza maleável da camada de sal, as pressões do reservatório de petróleo, entre outros, constituem elementos da natureza marinha, climática e geológica que, ao impor dificuldades técnicas de alta complexidade, determinam os desafios a serem superados e os rumos dos desenvolvimentos tecnológicos na produção de petróleo no mar.

Os exemplos a seguir ilustram algumas áreas de inovações tecnológicas na produção de petróleo diretamente impostas pelas condições prevalecentes no mar, nas rochas e no clima. As inovações podem ser de natureza radical ou incremental, e são demandadas não somente quando se realizam extrações de petróleo em águas e rochas mais profundas, mas também às mesmas profundidades em áreas novas, pois as condições ou as características geológicas e marítimas podem variar de um local para outro, em um mesmo campo de petróleo, ou em áreas adjacentes a um campo.⁵

- Desenvolvimento de isolamentos térmicos nos dutos (*risers*) que conduzem o petróleo e o gás natural dos poços até a plataforma, como forma de evitar entupimentos provocados por hidratos e parafinas decorrentes das baixas temperaturas no fundo do mar.
- Obtenção de materiais resistentes para superar as fadigas e evitar rupturas nos cabos de ancoragem das plataformas e nos *risers*, provocadas pelos movimentos das plataformas e pelas correntes marinhas em alto mar.
- Desenvolvimento de linhas de fluxo, *risers* e equipamentos para águas profundas, capazes de suportar a pressão da coluna d'água de até 3.000 metros entre a plataforma de produção e o poço de petróleo.⁶
- Desenvolvimento de sistemas de ancoragem e amarração em grandes profundidades, para manter a estabilidade e a posição das plataformas no mar, permanentemente atingidas pelos movimentos das ondas, correntes marinhas e ventos.
- Desenvolvimento de materiais resistentes para a completção de poços no pré-sal, capazes de suportar a pressão e os movimentos da camada de sal, de até 2 km de espessura, a fim de manter os poços abertos e em funcionamento.
- Estudos de métodos de recuperação avançada ou terciária de reservatórios para aumentar a vasão de hidrocarbonetos em relação à pressão natural e aos métodos de recuperação secundária.

Observa-se que as três condições ambientais que caracterizam a produção de petróleo no mar também interferem fortemente nos trabalhos da fase de exploração e, conseqüentemente, condicionam as inovações. São exemplos de desenvolvimentos tecnológicos necessários à exploração de novas áreas marítimas:⁷

- pesquisas de novas técnicas de levantamento de dados sísmicos para a obtenção de imagens mais nítidas das rochas sedimentares abaixo da camada de sal, com o objetivo de revelar áreas geológicas profundas, com possibilidades de existência de jazidas de petróleo;
- construção de navios-sonda com posicionamento dinâmico (dynamic positions, DP) capazes de realizar perfurações de poços com até 12 mil metros de extensão total; e
- inovações técnicas na amarração/ancoragem de plataformas semissubmersíveis de perfuração, por meio de cabos sintéticos leves com capacidade de posicionar plataformas em águas com profundidades superiores a 2.500 metros de lâmina d'água.

5. Um estudo ilustrativo das relações entre inovações tecnológicas para viabilizar a extração de petróleo e gás no pré-sal e as condições marinhas e geológicas prevalecentes naquela área é *Challenges and New Technologies for the Development of the Pre-salt Cluster, Santos Basin, Brazil*, de Beltrão *et al.* (2009).

6. A linha de fluxo e o *riser* são dutos flexíveis para a condução dos hidrocarbonetos extraídos de um poço de petróleo até a plataforma; a linha de fluxo é a seção instalada no leito oceânico e o *riser* é a parte vertical que chega até a plataforma.

7. Essas inovações são discutidas em Parshall (2007).

Os temas e as inovações tecnológicas nas fases de exploração e produção, como nos exemplos citados, são tratados em análises acerca das inovações implementadas em regiões do mundo onde os desafios técnicos impostos pelas condições hostis do mar e pelas águas profundas determinaram as trajetórias tecnológicas e o desenvolvimento de inovações em equipamentos e sistemas.⁸ Inovações pioneiras ocorreram na exploração e na produção no Golfo do México, nas décadas de 1930-1950, onde as complexidades tecnológicas levaram as atividades de P&D a assumir formato multidisciplinar e cooperativo, dada a necessidade de desenvolver ou de aprimorar novas disciplinas conexas à exploração no mar, como a meteorologia e a oceanografia. As grandes companhias de petróleo dos Estados Unidos criaram seus próprios laboratórios e equipes de pesquisa e se aproximaram de universidades para incentivar as novas áreas de conhecimento científico. O mesmo ocorreu no Brasil, a partir da segunda metade da década de 1970, quando a Petrobras se associou a universidades, instituições de pesquisa e empresas fabricantes visando ao desenvolvimento de equipamentos e sistemas para a produção de petróleo em águas profundas na bacia de Campos; naquele momento se iniciou o processo de inovações tecnológicas na produção de petróleo *offshore* no Brasil.

2.2 As grandes distâncias no mar

As grandes distâncias representam a segunda grande característica diferenciada da produção de petróleo *offshore*. Para produzir petróleo no mar, é necessário superar as barreiras impostas pelas distâncias entre as plataformas e os poços de petróleo no fundo do mar, que podem variar de algumas dezenas ou centenas de metros na extração em águas rasas a até cerca de 3 mil metros em águas ultraprofundas, ou alcançar dezenas de quilômetros quando as extrações provenientes de diversos poços são elevadas até uma plataforma central distante ou a terminais de processamento em terra. A profundidade do poço, desde a abertura inicial no solo marinho até o fundo do reservatório, pode alcançar, com base nas tecnologias atuais, até cerca de 9 mil metros, com o que se tem a distância total de até 12 mil metros, a ser coberta com dutos de produção nos poços e com *risers* até a plataforma (PARSHAL, 2007). Quanto às distâncias entre as plataformas e as costas marítimas, estas podem atingir até cerca de 320 quilômetros nas novas áreas petrolíferas descobertas no pré-sal brasileiro e em novas áreas em produção no Golfo do México.⁹

Quanto maiores as distâncias, maiores os desafios a serem superados, uma vez que o aumento das profundidades tende a acentuar as condições físicas prevaletes no mar. Como exemplo importante, águas mais profundas aumentam as pressões da coluna d'água a serem suportadas pelos equipamentos e dutos implantados no solo marinho, exigindo reforços em sua construção. Existem três classes de dificuldades ou desafios técnicos de maior complexidade a serem superados em decorrência das distâncias no mar:

- necessidade de utilização de métodos de controles remotos e de intervenções a distância nas operações de montagem de equipamentos nos poços e no solo marinho, nas remoções e reparos de equipamentos e nas operações continuadas de extração de petróleo e gás, entre outras operações;
- desenvolvimento de sistemas potentes de bombeamento para a elevação dos fluxos de petróleo/gás/água do solo marinho até a plataforma; e
- superação das dificuldades técnicas e logísticas decorrentes das longas distâncias dos campos de petróleo e das plataformas em relação à costa marítima.

As três categorias exigem avanços tecnológicos contínuos em plataformas, equipamentos dutos e sistemas de ancoragem de plataformas, como se discute a seguir.

8. As obras de referência citadas neste artigo representam alguns estudos que tratam das inovações requeridas na exploração e na produção em decorrência das condições ambientais e geológicas em águas profundas.

9. Ver Shell (2010).

Após a perfuração de um poço de petróleo e seu revestimento com tubos de aço e cimentação, são realizadas as operações de completação, ou seja, é necessário equipá-lo para começar a produzir. Este processo consiste em instalar: *i*) no interior do poço, o revestimento de produção (*liner*), a coluna de produção, os equipamentos de segurança de subsuperfície, entre diversos outros; *ii*) sobre o poço são dispostos a cabeça de poço, o *blowout preventer* e a árvore de natal com as linhas de fluxo; e *iii*) no solo marinho são alojados o *manifold* e os equipamentos para a separação de petróleo/gás/água, bem como os *risers* para a elevação dos fluxos extraídos até a plataforma.¹⁰

Dadas as grandes distâncias entre os equipamentos no fundo do mar e as salas de controles das plataformas – e sabendo-se que a presença humana por meio do trabalho de mergulhadores está limitada à profundidade entre 250/300 metros – as atividades de completação de poços, extração de hidrocarbonetos e manutenções e consertos somente são possíveis com o apoio de veículos de operação remota (*remotely operated underwater vehicle* – ROV), ou seja, veículos submarinos não tripulados, manobrados a distância por operadores nas plataformas. Os ROVs substituem o trabalho humano direto ou são utilizados no acompanhamento e apoio a mergulhadores. São equipados com computadores de bordo, câmeras de televisão, sonar para transmitir e receber sons, lâmpadas potentes, fibras ópticas, braços para cortes ou para a manipulação de ferramentas na instalação de equipamentos no fundo do mar e em intervenções para consertos, entre outros dispositivos. A construção de ROVs capazes de operar em águas profundas exige a aplicação de pesquisas avançadas nas áreas científicas correlatas – eletrônica, eletricidade, mecânica e robótica submarina, entre outras.¹¹ As árvores de natal, os *manifolds* e demais equipamentos instalados no mar são adaptados para receber intervenções dos veículos de operação remota.

Em função das distâncias, são utilizados cabos elétricos, para a transmissão de energia elétrica aos equipamentos no fundo do mar, e cabos umbilicais, isto é, um conjunto de mangueiras destinado a transmitir, a partir das plataformas, sinais elétricos e ópticos aos equipamentos localizados no fundo do mar e no poço, realizar controles hidráulicos de válvulas, injetar aditivos químicos, e diversas outras intervenções. Para o desenvolvimento de cabos umbilicais com alta resistência à pressão hidrostática, utilizados em águas ultraprofundas, a Petrobras vem realizando acordos de cooperação tecnológica com seus fornecedores, que resultaram em vários tipos de cabos certificados por empresas internacionais de qualificação, adotados nas especificações da American Petroleum Institute (API), principal associação comercial da indústria do petróleo e gás natural dos Estados Unidos.

A segunda categoria de desafios decorrente das distâncias reflete-se no desenvolvimento de sistemas potentes de bombeamento, de equipamentos para a separação de petróleo, gás e água, e de dutos para a elevação dos fluxos até a plataforma. Para vencer as forças da gravidade impostas pelas grandes profundidades e para facilitar a extração de maiores volumes do petróleo viscoso e denso de várias jazidas da bacia de Campos, a Petrobras desenvolveu, junto a empresas industriais e instituições de pesquisas, diversos sistemas com estas funções. São os casos das bombas elétricas para a elevação dos hidrocarbonetos extraídos do solo marinho até as plataformas, de equipamentos no leito marinho para a separação de petróleo/gás natural ou petróleo/água, e de bombas multifásicas potentes para elevação dos fluxos extraídos até a plataforma.

Na área de dutos para a elevação de petróleo e gás dos poços à plataforma, o aumento das profundidades determinou, nos anos 1970, na bacia de Campos, a adoção de importante inovação, os *risers* flexíveis, em razão de sua característica de se acomodarem aos movimentos das plataformas no mar, em substituição aos dutos rígidos que, então, conectavam os poços às plataformas flutuantes. A Petrobras participou dos primeiros desenvolvimentos dos *risers* flexíveis, em cooperação com a empresa fabricante francesa.

10. A cabeça de poço tem a função de vedar o poço, de sustentar os tubos instalados dentro do poço – como a coluna de produção – e de servir como base para a árvore de natal. O *blowout preventer* é um equipamento com válvulas para fechar o poço e impedir erupções de petróleo e gás natural, instalado sobre a cabeça de poço. A árvore de natal é um equipamento com válvulas, acoplado à cabeça de poço, para o controle dos fluxos de petróleo, gás natural, água extraídos. O *manifold* é um equipamento de grande porte que concentra a extração de diversas árvores de natal para a elevação dos fluidos extraídos até a plataforma, por meio de dutos flexíveis (denominado linha de fluxo, no solo marinho e riser na seção vertical até a plataforma). Quando a cabeça de poço e a árvore de natal ficam posicionadas no fundo do mar, o sistema é denominado de completação molhada; se instaladas na plataforma de produção, em águas mais rasas, denomina-se completação seca, utilizando-se *riser* rígido para a elevação dos fluxos extraídos até a plataforma (Thomas, 2004).

11. Os ROVs são controlados a partir das plataformas por cabos conectados. Podem trabalhar em profundidades de até 3 mil metros ou mais (Souza e Martins, 2007). Outros modelos se movimentam por meio de hélices acionadas por motores. Constituem-se de duas grandes classes: ROV de observação e ROV de trabalho (Silva, 2008).

As dificuldades técnicas apontadas, decorrentes das distâncias entre a plataforma e os poços, são intensificadas pelo fato da procura por petróleo avançar em direção a águas cada vez mais distantes das costas, o que conduz à terceira categoria de desafios a serem superados em decorrência das distâncias. As maiores distâncias de alguns dos campos de petróleo do pré-sal em relação à costa (de até 300 quilômetros) estão exigindo novo ciclo de inovações destinadas a diminuir custos logísticos e solucionar dificuldades técnicas relacionadas à disponibilização de equipamentos, provisões, uso de produtos químicos e equipes de trabalho nas plataformas.¹²

Um conjunto de inovações deverá ser desenvolvido na construção de plataformas de produção. Vários dos equipamentos pesados e de grande porte que atualmente estão instalados nas plataformas deverão, no futuro, ser dispostos no solo marinho, com o objetivo de diminuir suas dimensões, peso e custos de construção. São os casos das plantas de processamento primário (separação petróleo/gás natural/água/areia), dos equipamentos de compressão do gás natural para a exportação a terminais em terra, e equipamentos de geração de energia. Além destes, serão aprimorados os sistemas de bombeamento, para a condução dos fluidos extraídos a longas distâncias, e ROVs, para controles e intervenções sob grandes profundidades. Para o desenvolvimento de equipamentos apropriados para operar não mais nas plataformas, mas no leito marinho, a Petrobras vem realizando pesquisas com universidades e empresas fornecedoras, com horizonte de implantação de cerca de dez anos. Nesta perspectiva, poderão ser construídas plataformas mais leves, com menor tripulação, mais automatizadas e eventualmente operadas remotamente da terra, e estações intermediárias, no mar, para receber o pessoal técnico que chega do continente e conduzi-los posteriormente até as plataformas.¹³

2.3 Invisibilidade das operações no mar

A instalação dos equipamentos e as atividades de extração de petróleo no mar são, ainda, dificultadas pela completa invisibilidade das operações para os engenheiros e técnicos que controlam, nas salas de controle das plataformas, as operações no fundo do mar.¹⁴ A invisibilidade decorre das distâncias e acentua as complexidades operacionais decorrentes desta condição. Até certa profundidade, a invisibilidade é resolvida com o uso de câmeras portáteis com iluminação, levadas por mergulhadores, até cerca de 300 metros. Após esta profundidade, a utilização de veículos de operação remota, equipados com câmeras de televisão, lâmpadas potentes resistentes às condições no mar e dispositivos que medem a claridade da água e a penetração da luz, tornou-se imprescindível na visualização das operações no mar. Nesta função, ajudam a descobrir pontos de corrosão, fissuras e rompimentos em equipamentos, dutos e linhas de amarração/ancoragem para a realização de reparos. A utilização de ROVs para averiguações, monitoramentos e intervenções nos sistemas de produção marítima deverá crescer no futuro, com a tendência de localização no fundo do mar de equipamentos que hoje são instalados nas plataformas.

Uma quarta característica deve ser acrescentada, além das três comentadas: diz respeito à natureza dos hidrocarbonetos nos reservatórios, isto é, à composição química do petróleo e do gás natural e à densidade do petróleo, que também exigem a geração de tecnologias para a produção *offshore*, como se discute na seção a seguir.

3 DESAFIOS TECNOLÓGICOS DECORRENTES DA COMPOSIÇÃO E DA DENSIDADE DO PETRÓLEO E GÁS NOS RESERVATÓRIOS MARINHOS

A ocorrência de altas proporções de impurezas nos hidrocarbonetos, como o gás sulfídrico (H₂S), pode ocasionar corrosões nos materiais e equipamentos de aço utilizados na extração de petróleo. Outro elemento contaminante

12. Na bacia de Campos, a Petrobras transporta, do continente às plataformas, por meio de helicópteros, cerca de 44 mil pessoas por mês, em 6.300 voos, situação que não terá condições logísticas de se repetir nas longas distâncias do pré-sal da bacia de Santos. Disponível em: <<http://www.clickmacae.com.br/?sec=109&pag=pagina&cod=141>>.

13. Entrevista de Carlos Tadeu Fraga, gerente-executivo do Cenpes, ao jornal *Valor Econômico*, 28 dez. 2010, "Petrobras terá operação submersa no Pré-sal" (SHÜFFNER e GÓES, 2010).

14. A invisibilidade é decorrente das longas distâncias e da falta da luz solar em áreas profundas. O tema da invisibilidade foi também referido por Lerøen (2005).

é o dióxido de carbono (CO₂), que causa corrosão e aumenta as emissões poluentes na atmosfera. Quanto à densidade, o grau API do petróleo estabelece classificação segundo a densidade volumétrica, que indica a proporção de elementos leves ou pesados presentes no petróleo.¹⁵ Petróleos pesados e viscosos encontrados nos reservatórios podem exigir o desenvolvimento de bombas potentes para aumentar a produção dos poços.

Os dois fatores comentados exigem o desenvolvimento de inovações, com o objetivo de superar as barreiras na extração e na produção *offshore*. A seguir, alguns exemplos de inovações que foram desenvolvidas ou se encontram em fase de P&D para superar essas restrições.

- Desenvolvimento de ligas de metais e aços especiais para a construção de equipamentos, como árvores de natal e *risers* resistentes aos elementos corrosivos presentes no petróleo e no gás (BELTRÃO *et al.*, 2009).
- Desenvolvimento de bombas elétricas potentes para a instalação dentro de poços, com o objetivo de aumentar os volumes extraídos de petróleos viscosos e pesados (PETROBRAS, 2005).
- Construção de plataformas flutuantes equipadas com sistemas mais compactos para a separação do gás carbônico (CO₂) do gás natural, com a finalidade de viabilizar o transporte do gás para terminais em terra e aproveitar o CO₂ como um dos mecanismos de injeção nos reservatórios para aumentar o fator de recuperação de reservas (BELTRÃO *et al.*, 2009).

4 CONCLUSÕES

A abordagem realizada neste trabalho procurou, a partir de uma visão sistêmica, avaliar as condições e características prevalentes nas atividades petrolíferas *offshore* que induzem a geração de novas tecnologias, essenciais às atividades de extração e produção de petróleo. Verificou-se que o processo tem início a partir do reconhecimento dos obstáculos existentes em novas áreas petrolíferas, decorrentes das condições prevalentes nos ambientes marinho, climático e geológico, que impõem restrições à produção de petróleo com base nas tecnologias disponíveis. Os desafios tecnológicos gerados por descobertas de acumulações de petróleo em novas fronteiras marítimas são superados por meio de pesquisa, desenvolvimento e experimentação de novos ou aprimorados equipamentos e sistemas, que resultam em inovações incrementais ou radicais. No Brasil, esta dinâmica de indução de tecnologias ocorreu, num primeiro momento, a partir do início da produção de petróleo na bacia de Campos, em 1977, e foi aprofundado a partir de 1984-1985, quando a descoberta de campos de petróleo gigantes (Albacora e Marlim), localizados em profundidade de até cerca de 1.000 metros de lâmina d'água, exigiu a geração de novas tecnologias para viabilizar a extração/produção àquelas profundidades.¹⁶ Atualmente, exemplos representativos de desafios tecnológicos encontram-se: *i*) no início da produção no pré-sal da bacia de Santos, cujas condições geológicas, composição dos hidrocarbonetos, grandes profundidades e distâncias da costa marítima estão exigindo uma série de inovações para viabilizar a produção de petróleo em grande escala naquela fronteira geológica; e *ii*) no Golfo do México, nos desenvolvimentos que a Shell realizou para possibilitar a extração no campo de Perdido, cuja plataforma foi ancorada à profundidade recorde de 2.450 metros de lâmina d'água, à longa distância da costa e com poços perfurados sob lâminas d'água de até 2.950 metros.¹⁷

15. Conforme metodologia do American Petroleum Institute (API), principal associação comercial da indústria do petróleo e gás natural dos Estados Unidos.

16. As inovações foram implementadas por meio de amplo programa de capacitação tecnológica da Petrobras e parceiros (Programa de Capacitação Tecnológica para Águas Profundas – PROCAP), lançado em 1986, que coordenou os esforços de diversos agentes – instituições de pesquisas e universidades, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras (Cenpes) e empresas industriais e de serviços – para o desenvolvimento de novos equipamentos e sistemas para a produção de petróleo.

17. A análise da exploração e da produção no pré-sal brasileiro encontra-se no livro do autor a ser publicado citado na primeira nota de rodapé deste artigo. Entre os desafios tecnológicos do Pré-Sal a serem superados encontram-se: *i*) necessidade de melhor conhecimento das propriedades petrofísicas das rochas dos reservatórios, como a porosidade e a permeabilidade, para permitir, entre outros resultados, a definição dos mecanismos mais adequados para aumentar o fator de recuperação do petróleo e gás a serem extraídos, como são os casos da injeção de água nos reservatórios ou de combinações água/gás natural ou gás natural/gás carbônico; *ii*) novas concepções de *risers* com alta eficiência no isolamento térmico para operação em profundidades superiores a 2.500 metros,