



COBENGE

2019

XLVII Congresso Brasileiro
de Educação em Engenharia
e II Simpósio Internacional
de Educação em Engenharia
da ABENGE

17 a 20 SETEMBRO de 2019

Fortaleza - CE

"Formação por competência na engenharia
no contexto da globalização 4.0"

SISTEMAS MARÍTIMOS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO: UM EXEMPLO DE INTERDISCIPLINARIDADE DO CICLO BÁSICO DAS ENGENHARIAS

Hildson Rodrigues de Queiroz^{1,2} – hildsonqueiroz@yahoo.com.br

¹Petróleo Brasileiro S.A - PETROBRAS

Rua General Canabarro, 500 - Maracanã

20.271-205 – Rio de Janeiro – RJ

Geraldo Motta Azevedo Junior^{2,3} – prof.geraldomotta@gmail.com

Flávio Maldonado Bentes – flavio.bentes@gmail.com

Franco Fattorillo^{2,3} – francofattorillo@globo.com

²UNISUAM - Engenharias

Avenida Paris, 84 - Bonsucesso

21.041-020 – Rio de Janeiro – RJ

Marcelo de Jesus Rodrigues da Nóbrega - engmarcelocefet@terra.com.br

³Universidade Santa Úrsula – Coordenação das Engenharias

Rua Fernando Ferrari, 75 – Botafogo

22.231-040 – Rio de Janeiro – RJ

Resumo: O ciclo básico é um período do curso muito importante para os alunos de engenharia, pois é nesta fase que toda base de conhecimentos físicos e matemáticos necessários ao perfeito entendimento das disciplinas do ciclo profissional é apresentada aos estudantes. É durante o ciclo básico também que ocorre o maior percentual de evasão nos cursos de engenharia. Torna-se então um desafio mostrar ao aluno que os conceitos extenuantes de Cálculo e Física que estão sendo apresentados, fazem parte do arcabouço necessário para o completo entendimento de disciplinas do campo profissional, conseqüentemente, importantes para a sua formação como engenheiro e ainda mantê-lo motivado. A proposta desse trabalho é, por meio da interdisciplinaridade característica da indústria do petróleo, apresentar uma contextualização dos conceitos de Física, Cálculo, Termodinâmica e Fenômenos de Transporte, presentes nas fases de exploração e produção de um sistema marítimo de produção de petróleo, como resultado de uma estratégia de metodologia ativa de aprendizagem.

Palavras-chave: Petróleo. Ciclo básico das engenharias. Interdisciplinaridade. Metodologias ativas de aprendizagem. Sistema marítimo de produção de petróleo.

1 INTRODUÇÃO

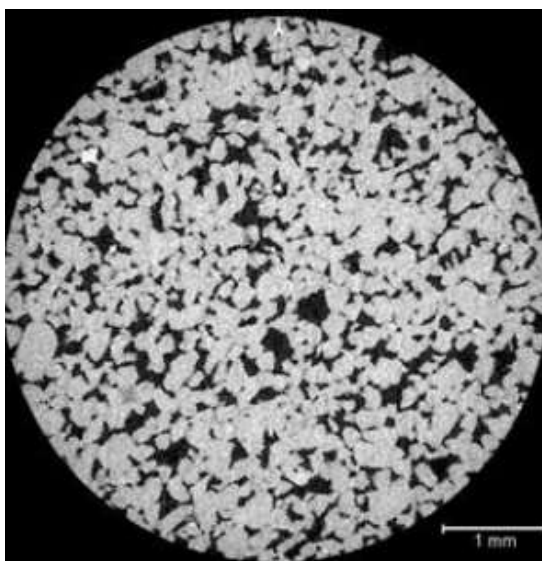
Buscar novas alternativas de abordagem dos conceitos referentes aos conteúdos das disciplinas do ciclo básico das engenharias, diferentes do método tradicional de aulas

expositivas, é uma necessidade nos dias atuais. Há estratégias de metodologias ativas de aprendizagem que podem ser utilizadas para criar esse ambiente de aprendizagem ativa em sala de aula. Dentre as estratégias que podem ser aplicadas, podemos destacar o estudo de casos em áreas profissionais específicas (BONWELL; EISON; 1991). Esta estratégia é utilizada nesse trabalho e o estudo de caso abordado refere-se à área da engenharia de petróleo, mais especificamente um sistema marítimo de produção de petróleo, desde a fase de pesquisa e busca por acumulações de hidrocarbonetos até a exploração do petróleo em uma unidade estacionária de produção (UEP).

Um sistema de produção petrolífero *offshore* percorre um longo caminho desde as pesquisas e descoberta do Reservatório (fase de exploração) até a operação do sistema propriamente dita (fase de produção). São ditas *offshore* as unidades produtoras de petróleo instaladas fora da costa, ou seja, no mar, sejam elas de superfície ou submarinas. Aproximadamente um terço da produção mundial de óleo cru é feita *offshore*. No Brasil esse número chega a mais de 80% (MORAIS, 2013).

Chama-se Reservatório a rocha porosa e permeável (interconexão dos poros) cujos hidrocarbonetos (líquido ou gás) estão presentes em seus poros. Na Figura 1 temos um corte 2D de microtomografia de uma rocha reservatório arenítica. As regiões de cor preta constituem a região porosa da rocha, onde se encontram os hidrocarbonetos. A parte sólida da rocha, na cor cinza, é chamada de matriz.

Figura 1 – Microtomografia de reservatório arenítico.



Fonte: Palombo *et al.* (2015)

A fase dos estudos e investimentos para se obter uma jazida de petróleo é chamada de Prospecção e envolve métodos geológicos e geofísicos aplicados em bacias sedimentares (THOMAS *et al.*, 2001). Após os estudos de prospecção, localizam-se, na bacia sedimentar, as regiões mais propensas a conter acumulações de petróleo, ou seja, reservatórios de óleo ou gás. Os métodos geofísicos de prospecção, de maneira geral, possuem suas bases teóricas contidas nas disciplinas de Física Básica lecionadas nos primeiros semestres dos cursos de engenharia.

Para verificar a existência do reservatório e se ele tem potencial econômico de produção, perfura-se um poço numa locação definida a partir dos estudos geológicos e geofísicos da fase de prospecção, chamado de poço exploratório. Durante a perfuração deste poço, é realizada a avaliação da formação, ou seja, análises e testes para obtenção das características da rocha e

dos fluidos presentes em seu interior. São coletados cascalhos (fragmentos da rocha), que retornam junto com o fluido de perfuração, que são avaliados por profissionais da Geologia, além da realização de testes de pressão, de formação e perfisagens para obtenção de dados como pressão estática do reservatório, porosidade, identificação de zonas de óleo e gás, entre outros.

Após a perfuração, o poço precisa ser completado. A completação é a instalação de equipamentos no poço para que ele opere em segurança. De maneira mais completa:

“Para colocar um poço de petróleo a produzir, primeiramente é necessário que sejam instalados, na cabeça e no interior do poço, equipamentos que garantam sua segurança, que permitam medições de variáveis importantes (pressão e temperatura, por exemplo), a manutenção do poço e a regulação da vazão dos fluidos produzidos. A esta primeira etapa dá-se o nome completação do poço. A completação tornará o poço pronto para a produção.” (GAUTO *et al.*, 2016, p.108).

Com o poço completado, ele é interligado à UEP, também denominada de plataforma de produção, para que o petróleo inicie seu escoamento a partir da rocha reservatório, sendo elevado através da coluna de produção (poço) e escoado pelas linhas submarinas até a plataforma, para que seja realizado seu processamento primário, ou seja, separação e tratamento do óleo, gás e água produzidos. Está formado o sistema marítimo de produção de petróleo. Nessa fase de escoamento do óleo (meio poroso, coluna de produção e linhas submarinas), são necessários conhecimentos de mecânica dos fluidos, transferência de calor e termodinâmica para que se possa obter a garantia de escoamento, ou seja, área responsável pela manutenção da produção do petróleo sem que ocorram intercorrências (formação de hidrato e parafina, por exemplo) durante seu trajeto até a UEP.

2 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DAS BASES FÍSICAS E MATEMÁTICAS EM UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO OFFSHORE

Abaixo apresenta-se o estudo de caso, como estratégia de metodologia ativa de aprendizagem, demonstrando algumas etapas presentes nos sistemas marítimos de produção de petróleo, cujas bases teóricas estão diretamente ligadas às disciplinas básicas dos cursos de engenharia.

2.1 Método Geofísico de Prospecção – Sísmica de Reflexão

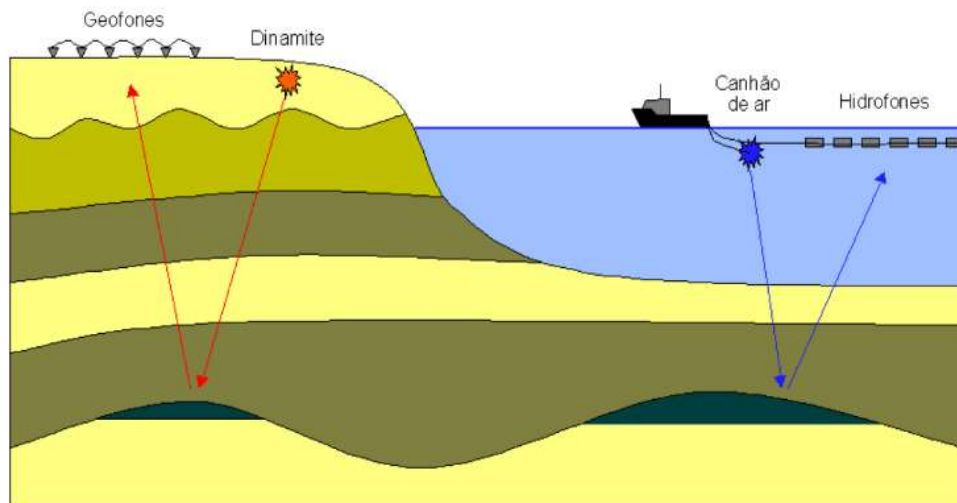
O passo inicial para a descoberta de uma acumulação de petróleo se constitui numa fase de estudos e análises de bacias sedimentares chamada de prospecção. A prospecção envolve métodos geológicos e geofísicos. Com relação aos métodos geofísicos, o mais utilizado na indústria do petróleo é o Método Sísmico de Reflexão, pois ele é o que fornece as melhores feições geológicas de subsuperfície, após a etapa de processamento dos dados de aquisição.

O processo de prospecção baseado na sísmica de reflexão pode ser dividido em etapas, a saber: aquisição, processamento e interpretação. Nesse trabalho, vamos analisar apenas a etapa de aquisição, em virtude de sua relação com a Ondulatória e Óptica Geométrica, conceitos pertencentes à Física Básica lecionada nos cursos de engenharia.

Conforme Figueiredo (2007), a aquisição dos dados é realizada por meio da geração de ondas elásticas artificiais de pequena duração, em torno de 200 ms, em determinados locais da região a ser mapeada. No caso de levantamentos marítimos, essas perturbações são geradas por meio de canhões de ar comprimido.

As ondas sísmicas geradas se propagam na água, adentram à subsuperfície e, ao atingir uma região de separação de duas rochas de características físicas diferentes, parte da onda incidente refrata através da nova rocha e parte da onda incidente reflete, sendo captada pelos hidrofones (sensores de captura da energia da onda refletida), ver Figura 2.

Figura 2 – Modelo representando a aquisição sísmica.



Fonte: Figueiredo (2007)

De acordo com a explicação acima sobre a etapa de aquisição, do método sísmico de reflexão, percebe-se que, apesar de seu funcionamento não requerer teorias muito complexas, para o seu perfeito entendimento, o conhecimento das propriedades das ondas mecânicas deve estar bem sedimentado, mostrando mais uma vez a importância das matérias do ciclo básico da engenharia.

2.2 Gerenciamento do Reservatórios

A principal tarefa da engenharia de reservatórios é o desenvolvimento e gerenciamento de campos produtores de petróleo, buscando maior produtividade, mas respeitando os limites físicos, econômicos e tecnológicos (MEZZOMO, 2000). Inerente ao gerenciamento do reservatório, encontra-se a tarefa de acompanhar a pressão em seu interior, pois ela é a responsável por expulsar os fluidos em seu interior e, conseqüentemente, pela produção de óleo e gás. Para acompanhar a pressão no interior do reservatório, dispõe-se da equação da difusividade hidráulica, dada por:

$$\frac{1}{\eta} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (1)$$

onde η é a constante de difusividade hidráulica, representada por:

$$\eta = \frac{K}{\phi \mu c_t}, \quad (2)$$

onde K é a permeabilidade absoluta, ϕ é a porosidade, μ é a viscosidade e c_t é a compressibilidade total. A equação da difusividade hidráulica é uma equação diferencial parcial de segunda ordem, é obtida por meio das equações da continuidade (Princípio de Conservação da Massa), Lei de Darcy (escoamento em meio poroso) e uma equação constitutiva associada ao fluido (ROSA; CARVALHO; XAVIER; 2006). Essa equação é fundamental para elaboração do modelo de simulação computacional do escoamento monofásico de óleo no interior do

reservatório. Como a obtenção de uma solução analítica para este tipo de equação não é geralmente conseguida, necessita-se de um método numérico para obter sua solução computacional (LIBARDI; ROMERO; 2014).

A partir do exposto acima, percebe-se a gama de assuntos relacionados a disciplinas básicas da engenharia presentes no contexto. Dos quais, podemos citar: equações diferenciais (Cálculo), métodos numéricos para solução de equações diferenciais (Cálculo Numérico), escoamento em meio poroso e equação da continuidade (Fenômenos de Transporte).

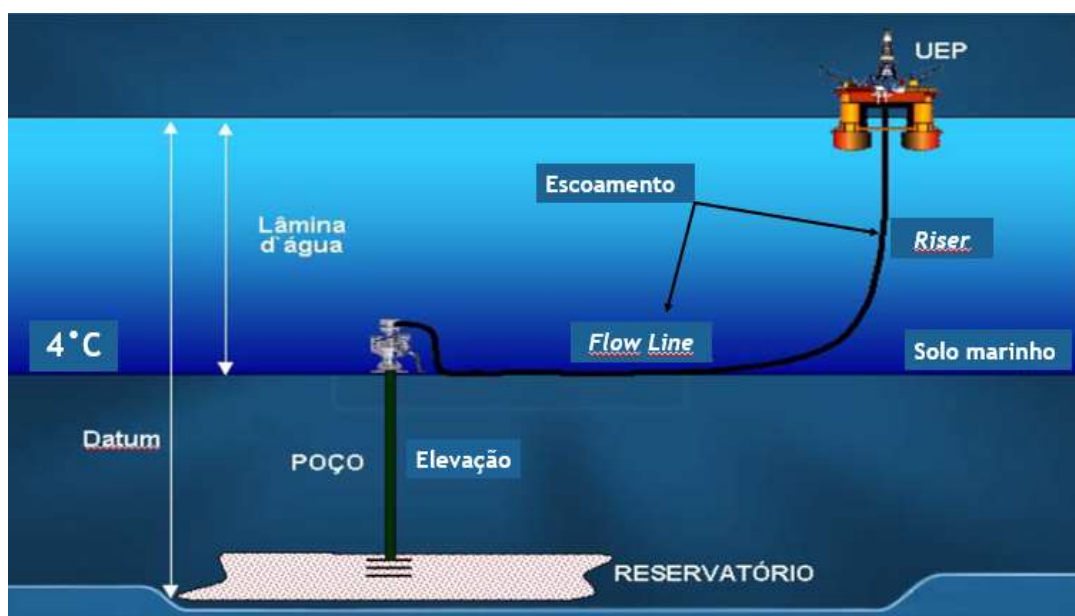
2.3 Elevação e escoamento do petróleo até a UEP

Os primeiros relatos do uso de dutos para transporte de óleo cru datam de 1859 nos Estados Unidos. Com o passar dos anos, o transporte dutoviário de óleo e gás se mostrou como sendo o meio mais eficiente, confiável e barato (GUO et al., 2005).

Os dutos flexíveis podem ser utilizados em múltiplas aplicações, incluindo produção de óleo, injeção de água, injeção de gás e injeção de substâncias químicas em um reservatório de óleo e gás (REDDA, 2010)

O petróleo ao sair da rocha reservatório adentra à coluna de produção (poço produtor) e após chegar na cabeça do poço, escoam através da *flow line*, que é a tubulação de escoamento dos fluidos que está assentada no leito marinho. Após cumprir esse trecho do duto de escoamento, os fluidos iniciam seu escoamento pelo trecho que descola do leito marinho e faz uma catenária até chegar à plataforma de produção. Este trecho do duto de escoamento dos fluidos é chamado de *riser* (Figura 3).

Figura 3 – Esquema de elevação e escoamento dos fluidos em sistemas marítimos de produção de petróleo.



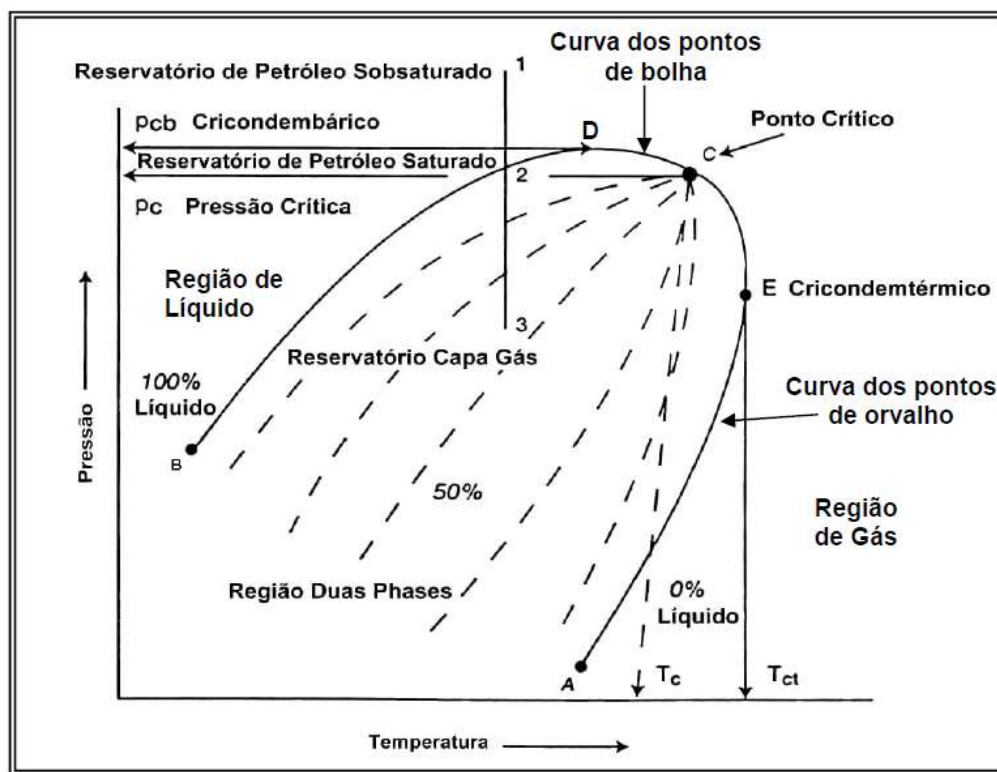
Fonte: adaptado pelos autores (2019).

A escolha do *riser* mais adequado para o desenvolvimento da produção será baseada em critérios como condições ambientais, perfil de correntes submarinas, profundidade e *layout* do campo, excursão e movimento da unidade flutuante, número de *risers*, carga máxima do sistema de suspensão do *riser*, facilidade e custo de instalação (DOLINSKI, 2009).

Em um reservatório de óleo subsaturado (pressão do reservatório maior do que a pressão de bolha do fluido), normalmente o fluxo de saída do meio poroso para entrada no poço é bifásico óleo-água, devido a existência de aquíferos adjacentes. À medida em que o petróleo

escoa em direção à UEP, sua pressão diminui e, quando atinge o valor da pressão de bolha do óleo, o gás que se encontra dissolvido no óleo começa a se desprender, formando um fluxo trifásico (óleo, gás e água). O comportamento termodinâmico dos fluidos de reservatório é obtido através do Diagrama de Fases pressão – temperatura, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama de Fases Pressão-Temperatura do fluido de reservatório.



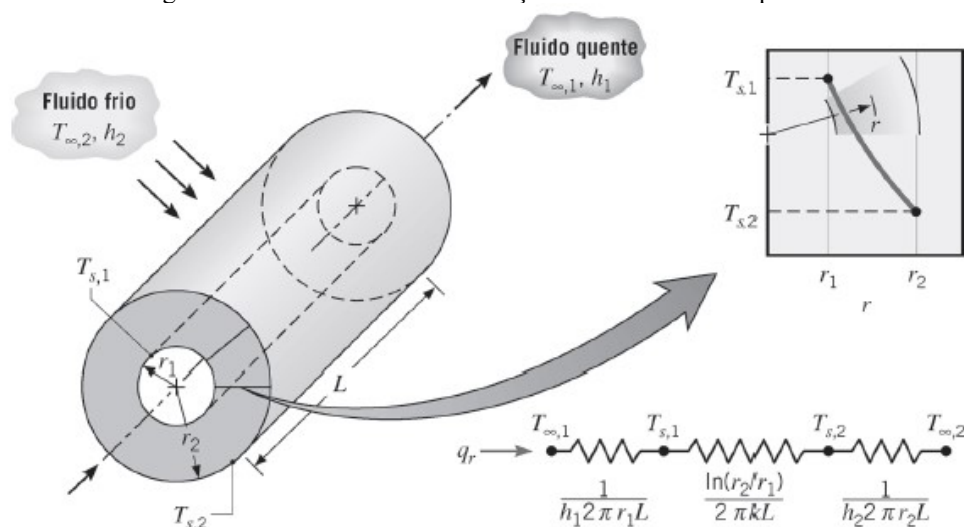
Fonte: Guiteras (2003).

Conforme Rodrigues (2011), as atividades de previsão, prevenção, mitigação e remoção de depósitos orgânicos e inorgânicos, além de outros fenômenos que possam interromper parcial ou totalmente a capacidade de escoamento de um sistema de produção, são chamadas de garantia de escoamento. Como a temperatura da água no fundo do mar gira em torno de 4 °C e, segundo Queiroz (2007), “A formação de fases sólidas nos dutos de transporte de hidrocarbonetos é geralmente associada ao resfriamento ou a queda da temperatura do fluido a valores menores de certos valores críticos”, constata-se que os longos trechos de escoamento do petróleo no leito marinho, representa um problema de garantia de escoamento.

A fim de evitar a perda excessiva de calor do petróleo devido às transferências de calor por convecção, devido o escoamento, e condução através da parede do duto, uma vez que sua temperatura externa é da ordem de 4°C, utiliza-se a estratégia de se isolar termicamente a região externa do duto submarino, atenuando a perda de calor ao longo de sua parede. É importante destacar que esta camada isolante cumpre uma dupla função, a de isolamento, propriamente dita, bem como também de proteção à corrosão.

Como a temperatura do petróleo no interior do duto é superior à temperatura externa, o fluxo de perda de calor é orientado de dentro do duto para fora, uma vez que o fluxo de calor vai da temperatura maior para a menor ($T_{s,1} > T_{s,2}$). Inicialmente por convecção entre a corrente de fluido e a parede interna do duto e por condução ao longo da espessura da tubulação, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Duto circular com condições convectivas na superfície



Fonte: Incropera (2017)

A taxa de transferência de calor na condução térmica é regida pela Lei de Fourier e na convecção é regida pela Lei do Resfriamento de Newton, Incropera (2017), conforme, respectivamente, as equações abaixo.

Lei de Fourier:

$$q_r = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (3)$$

Sendo:

k – condutividade térmica do material do tubo;

L – comprimento do tubo;

dT/dr – gradiente de temperatura na direção r ;

r – posição ao longo da direção radial.

Lei do Resfriamento de Newton:

$$q_r = h.A.(T_\infty - T_s) \quad (3)$$

Sendo:

h – coeficiente de transferência de calor por convecção;

A – área de troca térmica;

T_∞ – temperatura do fluido;

T_s – temperatura da superfície externa do duto.

Sendo assim, tem-se uma modelagem matemática que leva em consideração o cálculo por resistências térmicas, que simplifica o cálculo tanto na condução, como na convecção, uma vez que a resistência térmica total é o somatório dos valores parciais. Em decorrência do material utilizado no isolamento (com baixa condutividade térmica), busca-se reduzir a quantidade de calor para o meio externo, uma vez que este (isolante) oferecerá uma alta resistência térmica se comparado com o material metálico da tubulação que, por sua natureza, possui valores de k elevados e, conseqüente, baixa resistência térmica.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou, através de um estudo de caso contextualizado da indústria do petróleo (sistema marítimo de produção de petróleo), demonstrar que os conhecimentos obtidos no ciclo básico das engenharias são tão importantes quanto os adquiridos nas disciplinas do ciclo profissional, pois se aqueles não estiverem bem sedimentados, haverá maior dificuldade para se adquirir as competências necessárias para se tornar um engenheiro. A análise desse sistema mostrou que uma base sólida dos conhecimentos básicos é de suma importância para a plena compreensão dos fenômenos envolvidos em problemas de engenharia.

Outro objetivo deste trabalho foi fornecer subsídios para atender ao que é preconizado nas novas Diretrizes Curriculares Nacionais dos Cursos de Engenharias, notadamente em seu artigo 6º, incisos §6º e §7º. Dentro deste contexto, é fundamental que sejam estimuladas atividades acadêmicas de síntese de conteúdos e de integração dos conhecimentos adquiridos pelo discente ao longo de seu curso. Além disso, devem ser desenvolvidas estratégias metodológicas para a aprendizagem ativa, como forma de se promover uma educação mais centrada no aluno. Além disso, também é preconizado nas novas Diretrizes que o egresso de engenharia deve possuir a competência de adotar perspectivas multidisciplinares e transdisciplinares em suas práticas.

Como facilitador para aplicação de metodologias ativas ao ensino de engenharia, podem ser utilizados Estudos de Caso associados ao sistema estudado nesse trabalho. Esses estudos devem abranger análises relacionadas às disciplinas do ciclo básico, tais como os Cálculos, as Físicas, Fenômenos de Transporte, Termodinâmicas, entre outras.

REFERÊNCIAS

BONWELL, C.; EISON, J. Active Learning: Creating Excitement in the Classroom. **ERIC Digest**, Washington DC, Publication Identifier: ED340272, 1991.

BERGMAN, Theodore *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC editora, 2017.

DOLINSKI, Anderson; Projeto de Dutos Flexíveis para Aplicação Submarina. In: FREIRE, José Luiz de França; Engenharia de Dutos. Rio de Janeiro: Transpetro; ABCM, 2009. Cap 17 p.17.1-17.31

FIGUEIREDO, Aurélio Moraes. Mapeamento Automático de Horizontes e Falhas em Dados Sísmicos 3D baseado no algoritmo de Gás Neural Evolutivo. 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GAUTO, Marcelo Antunes *et al.* **Petróleo e Gás: Princípios de Exploração, Produção e Refino**. Porto Alegre: Bookman. 2016.

GUITERAS, Oscar Hernán Jalil. Metodologia para o Desenvolvimento de Análise Global para o Desenvolvimento de um Campo de Gás Natural. 2003. 285 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

GUO, Boyun; SONG, Shanhong; CHACKO, Jacob; GHALAMBOR, Ali; Offshore Pipelines. 1 ed. Oxford: Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2005. 281p.

LIBARDI, C.C; ROMERO, O.J.; Desenvolvimento de um simulador numérico para o estudo do escoamento de petróleo em meios porosos. **Latin American Journal of Energy Research**, São Mateus, n.1, p. 10-20, 2014.

MEZZOMO, Cristina Cledia. Otimização de Estratégias de Recuperação para Campos de Petróleo. 2001. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

MORAIS, José Mauro de; **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. 1ed. Brasília: Ipea, Petrobras, 2013. 424p.

PALOMBO, L.; ULSEN, C.; ULIANA, D.; COSTA, F.R.; YAMAMOTO, M.; KAHN, H.; Caracterização de rochas reservatório por microtomografia de raios X. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481547288007>. Acesso em: 06 mai. 2019.

QUEIROZ, Deni Lemgruber. Influência da Convecção Natural no Resfriamento de Dutos Submarinos de Petróleo e Gás. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

REDDA, Mahmoud; OffshoreBook – **An introduction to offshore industry**. 1ed. Danmark: Offshore Center Danmark, 2010. 117p.

RODRIGUES, Bruno Fontes. Análise de Processamento Submarino na Produção de Óleo e Gás: as Novas Perspectivas sem o Uso de Plataformas. 2011. 145 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ROSA, Adalberto José; CARVALHO, Renato de Souza; XAVIER, José Augusto Daniel. **Engenharia de reservatórios de petróleo**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2006.

THOMAS, José Eduardo *et al.* **Fundamentos da Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Editora Interciência. 2001.

MARINE SYSTEMS OF PETROLEUM PRODUCTION: AN EXAMPLE OF INTERDISCIPLINARITY IN THE BASIC CYCLE OF ENGINEERING

Abstract: The basic cycle is a period of fundamental importance for engineering students, because it is at this stage that every physical and mathematical knowledge base necessary for the perfect understanding of the subjects of the professional cycle is presented to the students. It is also during the basic cycle that the highest percentage of evasion occurs in engineering courses. It is then a challenge to show the student that the strenuous concepts of Calculus and Physics being presented are part of the framework necessary for the complete understanding of professional disciplines that are important for his training as an engineer, and still keep them motivated. The proposal of this work is, through the interdisciplinarity characteristic of the oil industry, to present a contextualization of the concepts of Physics, Calculus, Thermodynamics and Transport Phenomena, existing in the phases of exploration and production of a maritime oil production system, as a result of an active learning methodology strategy.

Keywords: Oil; Basic cycle of engineering; Interdisciplinarity; Active learning methodologies; Maritime oil production system.