

Proposta de criação do *Diploma de Estudos Avançados em Geo-Engenharia de Reservatórios Carbonatados*

1. - Introdução

Em 2010, por ocasião da X Cimeira Luso-Brasileira, realizada em Lisboa, o Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) do Brasil e o Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (MCTES) de Portugal assinaram um acordo para o lançamento do Programa de Formação Avançada e Pesquisa Conjunta no sector de exploração e produção de hidrocarbonetos em águas profundas na Bacia do Atlântico. O acordo tem por base a parceria estratégica entre a empresa estatal brasileira Petrobras e a empresa portuguesa Galp Energia para exploração petrolífera de águas ultra-profundas, sendo o principal objectivo deste acordo a promoção dos mecanismos de financiamento de Projectos de Investigação e Desenvolvimento e de Programas de Formação Avançada.

O programa previsto tem ainda por objectivo estimular e aprofundar a colaboração em Investigação e Desenvolvimento dos países no Sector de Energia, nas áreas de Geologia, Geofísica, Petrofísica, Geomecânica, Geoestatística, Avaliação e Engenharia de Reservatórios.

Uma vez que o segmento de águas profundas representa uma nova fronteira da indústria petrolífera, com importante potencial económico, as duas empresas decidiram, como primeiro passo, contribuir para o lançamento de um Diploma de Estudos Avançados em Geo-Engenharia de Reservatórios Carbonatados, que possa vir a ser no futuro, o embrião de projectos de investigação conjuntos entre as duas empresas e as instituições científicas dos dois países.

Com base neste entendimento, as Instituições de Ensino Superior Portuguesas em colaboração com Instituições de Ensino Superior Brasileiras, com a Galp Energia e a com a Petrobrás, decidiram criar o *Diploma de Estudos Avançados em Geo-Engenharia de Reservatórios Carbonatados*.

Trata-se de um Diploma de Estudos Avançados (DEA) que se diferencia claramente da oferta existente de formação nesta área em Portugal e no Brasil, associando as seguintes, Instituições de Ensino Superior Portuguesas:

- Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa (IST);
- Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL);
- Universidade de Aveiro (UA);

em colaboração com as seguintes Instituições de Ensino Superior Brasileiras:

- Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP);
- Universidade Estadual Paulista (UNESP).

2. - Objectivos

O Instituto Superior Técnico definiu a Energia como um dos vetores chave para o seu desenvolvimento estratégico de médio termo. Concretamente, a área da exploração e produção de hidrocarbonetos é explicitamente definida como um dos fatores estratégicos da escola, expressa no documento “Iniciativa em Energia do IST. Agenda Estratégica” da Comissão Instaladora da área transversal de Energia do IST.

O Instituto Superior Técnico tem, no seu Departamento de Civil, Arquitectura e Georrecursos, competência qualificada e reconhecida internacionalmente numa das áreas de maior importância na exploração de hidrocarbonetos - a caracterização de reservatórios.

Associando a suas competências às da Universidade de Aveiro na área da geofísica, e da Faculdade de Ciências na área da geologia, O IST propõe a criação de um DEA na área da *Geo-Engenharia de Reservatórios Carbonatados*. O DEA permitirá às empresas participantes, dotar os seus quadros de competências técnicas diferenciadoras na área da Exploração e Produção de hidrocarbonetos.

Trata-se de um programa que pretende formar quadros que possam responder aos desafios que são enfrentados ao nível da exploração de petróleos em águas ultra profundas e nos contextos específicos das rochas carbonatadas, as quais hospedam das mais importantes reservas de hidrocarbonetos recentemente descobertas.

O DEA em *Geo-Engenharia de Reservatórios Carbonatados* tem por objectivo promover uma forte integração multidisciplinar de geofísicos, geólogos e engenheiros, de forma a dotar estes profissionais, de competências transversais a estas disciplinas. Trata-se de um programa integrador das várias áreas e desafios que actualmente se constata no sector da exploração de petróleos.

Pretende-se que, com a frequência deste programa, os estudantes desenvolvam competências, aptidões e métodos de investigação no domínio da *Geo-Engenharia de Reservatórios Carbonatados*, nomeadamente:

- Capacidade de compreensão sistemática neste domínio científico e tecnológico;
- Capacidade para conceber, projectar, adaptar e contribuir para os desafios da exploração e produção de petróleos neste tipo de reservatórios, nomeadamente, em águas ultra profundas;
- Capacidade de análise crítica, avaliação e síntese de ideias novas e complexas;
- Capacidade de comunicação com os seus pares, a restante comunidade académica e empresarial, e a sociedade em geral sobre a área em que se especializaram;
- Capacidade para, numa sociedade baseada no conhecimento, promover o progresso tecnológico, social e cultural, em contexto académico ou profissional.

3. - Organização e funcionamento do Curso

- Aulas: Cada unidade curricular será leccionada em Módulos de uma Semana de 5 dias. Cada dia com 8 horas de aulas, em formato presencial ou vídeo-conferência.
- Carga Horária Total: 1680 horas (60 ECTS)
- Número de Alunos: até 18 (dezoito) alunos, oito alunos seleccionados no Brasil e oito alunos seleccionados em Portugal.
- Perfil Desejável dos Candidatos: 2-3 geólogos; 2-3 geofísicos e 2-3 engenheiros de reservatórios, no âmbito da selecção em cada país.
- Experiência profissional dos Candidatos: preferencialmente com mais de um ano e menos de cinco anos de experiência profissional. Poderão ser admitidos candidatos sem experiência profissional, mas que revelem um excelente currículo académico.
- Avaliação: cada módulo semanal terá avaliação obrigatória e no final do curso cada aluno apresentará uma monografia individual.
- Operacionalização: O Curso de Geo-Engenharia de Reservatórios Carbonatados é constituído por 14 unidades curriculares leccionadas em sala de aula e 2 de trabalho de campo, de 40 horas cada, que serão administrados da seguinte forma:
 - 13 unidades curriculares serão leccionadas no formato presencial. 3 unidades curriculares serão leccionadas no formato vídeo-conferência;
 - Cada módulo terá uma componente teórica e uma componente prática;
 - Haverá vídeo-conferência de apoio aos trabalhos práticos de avaliação, a ser realizada duas semanas após o término de cada unidade curricular;

- Toda a infra-estrutura de hardware e software estará disponível aos participantes antes do início de cada unidade curricular.
- A realização do curso será precedida pela frequência de “Módulos de Nivelamento”, igualmente sujeitos a avaliação, que procuram sintetizar um conjunto de matérias chave/conceitos introdutórios cujo domínio se revela imprescindível para obter o sucesso no curso, e dirigidos quer aos geólogos, quer aos engenheiros que frequentarão o curso.

4. - Enquadramento do curso na rede de formação nacional da respectiva área explicitando as razões para a sua criação

Um conjunto de características únicas separa a formação oferecida neste programa das ofertas existentes nas Universidades Portuguesas:

- Por um lado este programa, sendo dirigido a um público-alvo com interesses mais especializados, permite o aprofundamento de matérias no sentido das aplicações que se pretendem estudar, e a oferta de um conjunto de opções bastante específicas a este sector de actividade.
- Por outro lado, o forte envolvimento das empresas promotoras na estruturação e acompanhamento do programa irá permitir criar condições únicas de funcionamento, quer ao nível do apoio na formação dos alunos, quer ao nível da definição de oportunidades nos desenvolvimentos directamente ligados à experiência empresarial presente, nos aspectos de apoio logístico e financeiro, e ao nível de integração dos formandos no mercado de trabalho após a conclusão deste programa.
- Adicionalmente, pretende-se que a formação oferecida neste programa possa ser aproveitada para o desenvolvimento de conhecimentos dos técnicos que integram actualmente os quadros das empresas promotoras.

A natureza bastante especializada da formação oferecida neste programa de formação avançada justifica plenamente o seu funcionamento como programa leccionado em associação entre as várias Universidades permitindo conjugar competências, experiências diversas e recursos materiais existentes nas várias instituições. Adicionalmente, a forte interacção criada entre docentes das várias escolas irá permitir um melhor conhecimento das competências dos vários grupos de investigação nacionais e brasileiros potenciando o início de

novos projectos de investigação em consórcio, envolvendo as várias Universidades e as empresas Promotoras do Programa.

5. - Estrutura curricular

PLANO DE ESTUDOS DO DEA EM GEO-ENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS CARBONATADOS(*)¹

Unidades Curriculares	Área Científica	Horas Trabalho	Horas Contacto	ECTS	Instituição	
					Coord.	Apoio
Geologia de Reservatórios Carbonatados I		84	T:20; P:20; OT:5	3	UNESP	FCUL
Geofísica de Reservatórios Carbonatados		84	T:20; P:20; OT:5	3	UNESP	UA
Escoamento em Meios Porosos		84	T:20; P:20; OT:5	3	UNICAMP	
Probabilidade e Geoestatística		84	T:20; P:20; OT:5	3	IST	UNESP
Geologia de Reservatórios Carbonatados II		84	T:20; P:20; OT:5	3	FCUL	UNESP
Geologia Estrutural e Geomecânica		84	T:20; P:20; OT:5	3	UA	IST
Inversão Sísmica para Reservatórios Carbonatados		168	T:40; P:40; OT:10	6	IST	UNICAMP
Interpretação de Perfis de Poços e Petrofísica		84	T:20; P:20; OT:5	3	UA	UNESP
Comportamento de Reservatórios		84	T:20; P:20; OT:5	3	UNICAMP	
Métodos de Recuperação de Petróleo		84	T:20; P:20; OT:5	3	UNICAMP	
Interpretação Sísmica de Reservatórios Carbonatados		84	T:20; P:20; OT:5	3	UNESP	UA
Modelagem Geológica de Reservatórios Carbonatados		84	T:20; P:20; OT:5	3	UNESP	IST
Análise de Testes em Poços		84	T:20; P:20; OT:5	3	UNICAMP	

¹ Este plano de estudos não inclui os módulos de nivelamento (ver Sinopse).

Simulação Numérica de Reservatórios Carbonatados		84	T:20; P:20; OT:5	3	UNICAMP	IST
Bacia Lusitânica		84	TC:40; OT:5	3	FCUL	
Microbialitos Proterozóicos / Cretácicos		84	TC:40; OT:5	3		
Projecto		336	OT:20	12		

(*) A distribuição de créditos e de cargas horárias ainda se encontra em fase de discussão pelo que poderá vir a sofrer algumas pequenas alterações.

Conteúdos Programáticos

I. Unidades curriculares do DEA em Geo-Engenharia de Reservatórios Carbonatados

1. Geologia de Reservatórios Carbonatados I:

- Princípios da sedimentação e principais constituintes das rochas carbonatadas
- Classificação de rochas carbonatadas
- Ambientes deposicionais em rochas carbonatadas
- Diagênese em rochas carbonatadas

2. Geofísica de Reservatórios Carbonatados:

- Noções de aquisição sísmica
- Processamento sísmico para caracterização e monitoramento
- Geofísica de poço (VSP, VSP *walkaway*, VSP 3D, etc)
- Noções de inversão sísmica e AVO
- Metodologias de fácies sísmicas
- Sísmica 4D
- Monitoramento sísmico permanente
- Sísmica multicomponentes

3. Escoamento em Meios Porosos:

- Equação da difusão para sistema incompressível
- Equação de difusão para sistema pouco-compressível
- Equação da difusão para sistema compressível
- Regimes de escoamento
- Escoamento multifásico
- Escoamento de gás natural
- Escoamento de alta velocidade e turbulento
- Escoamento em meios porosos fraturados

4. Probabilidade e Geoestatística:

- Introdução à teoria da probabilidade
- Integração da Incerteza na avaliação de reservas globais
- Análise Exploratória de Dados
- Análise de dados multivariados
- Análise da Continuidade Espacial
- Estimção Geoestatística: Krigagem; krigagem simples;
- Krigagem de variáveis categóricas (litologias)
- Krigagem com médias locais; Co-krigagem
- Estimção de valores extremos: formalismo da indicatriz

5. Geologia de Reservatórios Carbonatados II:

- Propriedades petrofísicas das rochas carbonatadas
- Heterogeneidades dos reservatórios carbonatados.
- Unidades de fluxo dos reservatórios carbonatados.
- Uso de análogos de afloramentos e de subsuperfície

6. Geologia Estrutural e Geomecânica:

- Análise de tensões e deformações
- Análise estrutural
- Cinemática de falhas
- Geodinâmica
- Modelos constitutivos
- Poroelasticidade
- Propriedades geomecânicas das rochas
- Simulação numérica geomecânica de reservatórios
- Avaliação do potencial selante e de reativação de falhas

7. Inversão Sísmica para reservatórios Carbonatados:

- Análise de viabilidade do conjunto dos dados para inversão sísmica
- Calibração dos poços e da sísmica. Construção do modelo de baixas frequências
- Estimativa de *wavelets* (multi-poços).
- Métodos de inversão sísmica determinísticos.
- Control de Qualidade dos dados de impedância acústica.
- simulação de variáveis categóricas; modelos Plurigaussianos; modelos Estatística Multiponto;
- Modelos Directos de Integração da Informação Sísmica
- Modelagem de propriedades petrofísicas: modelos de simulação sequencial; simulação sequencial Gaussiana e simulação sequencial directa.
- Modelos de simulação conjunta. Modelos de co-simulação de propriedades petrofísicas
- Avaliação da incerteza espacial. Análise de Incerteza em fases de exploração e “appraisal”. Integração de modelos geológicos conceptuais: “Bootstrapping” espacial.
- Construção do modelo de baixas frequências a partir dos modelos simulados
- Inversão acústica estocástica
- Inversão Elástica estocástica
- Transformação do cubo de impedâncias acústicas em propriedades petrofísicas

8. Interpretação de Perfis de Poços e Petrofísica:

- Ambiente de perfuração e perfilagem
- Noções de perfilagem de poço e ferramentas de perfilagem
- Introdução aos perfis básicos - cáliper, raios gama, resistividade
- Perfis especiais - espectrais, neutrons pulsados, ressonância magnética
- Introdução à Petrofísica avançada

- Efeitos de fluido e rocha em perfis
- Cálculos de volume de argila, porosidade e saturação de fluidos.
- Introdução à correlação rocha-perfil
- Introdução aos perfis de produção

9. Comportamento de Reservatórios:

- Caracterização dos fluidos dos reservatórios
- Tipos de reservatórios e mecanismos de produção
- Balanço de materiais em reservatórios de óleo e gás
- Cálculo do influxo de água
- Modelos de declínio de produção
- Plano de desenvolvimento
- Monitoramento e gerenciamento de reservatórios - tecnologia *smart*
- Avaliação determinística e probabilística de reservas

10. Métodos de Recuperação de Petróleo:

- Deslocamento imiscível de óleo em meios porosos
- Recuperação secundária por injeção de água
- Miscibilidade - primeiro contato e múltiplos contatos
- Métodos miscíveis de recuperação - CO₂ e gás natural
- Injeção alternada de água e CO₂/gás natural
- Métodos químicos de recuperação
- Métodos térmicos de recuperação
- Métodos não-convencionais de recuperação

11. Interpretação Sísmica de Reservatórios Carbonatados:

- Conceitos de Estratigrafia Sísmica
- Calibração perfil-sísmica
- Mapeamento de horizontes estratigráficos
- Mapeamento de falhas
- Extração de atributos sísmicos
- Conversão tempo-profundidade

12. Modelagem Geológica de Reservatórios Carbonatados:

- Interpretação de perfis
- Correlação rocha-perfil
- Análise de dados sísmicos
- Modelagem de fácies
- Modelagem petrofísica
- *Up-scaling*
- Simulações com linhas de fluxo (*stream lines*)
- Análise de incertezas

13. Análise de Testes em Poços:

- Conceitos fundamentais, tipos e objetivos de testes
- Soluções clássicas da equação da difusão hidráulica
- Métodos de análise de testes em poços
- Princípio da superposição (tempo e espaço)
- Efeitos locais (estocagem e película)
- Influência de limites em reservatórios
- Testes em reservatórios de gás
- Testes em reservatórios heterogêneos
- Testes em poços fraturados artificialmente

14. Simulação Numérica de Reservatórios Carbonatados:

- Formulações *black oil*, composicional e térmica
- Discretização de modelo geológico para simulação de escoamento
- Caracterização de fluidos *black oil*, composicional e térmica
- Interações rocha-fluido na simulação
- Modelagem de sistemas de dupla porosidade e permeabilidade
- Ajuste de histórico de produção e pressão
- Análise de sensibilidade e incertezas
- Otimização de projeto de desenvolvimento

II. Módulos de Nivelamento:

1. Matemática para Geoengenharia - Parte 1

- Fundamentos de Cálculo Diferencial e Integral (5 dias)
 - ⇒ Noções de Limites, Continuidade e Taxas de Variação
 - ⇒ Diferenciação (equação de Darcy)
 - ⇒ Regra da Cadeia
 - ⇒ Integração (pressão em um fluido, potencial)
 - ⇒ Funções Logarítmicas e Exponenciais
 - ⇒ Funções e Várias Variáveis
 - ⇒ Equações Diferenciais Ordinárias
 - ⇒ Séries Infinitas (expansão por série de Taylor)
 - ⇒ Espaço Vetorial
 - ⇒ Sistemas Coordenados
 - ⇒ Operadores gradiente, divergente e rotacional
 - ⇒ Funções Vetoriais
 - ⇒ Tensores de 2ª ordem
 - ⇒ Funções de Várias Variáveis
 - ⇒ Derivadas Parciais
 - ⇒ Equações Derivadas Parciais de 1ª e 2ª ordem (Equação da Difusividade)
 - ⇒ Noções de Transformadas de Laplace (Solução da Fonte Linear)

2. Matemática para Geoengenharia - Parte 2

- **Cálculo Numérico (2 ½ dias)**
 - ⇒ Métodos Diretos e Iterativos
 - ⇒ Algoritmos e Convergência
 - ⇒ Linearidade e Não-Linearidade (compressibilidade)
 - ⇒ Método de Newton-Raphson
 - ⇒ Sistemas de Equações
 - ⇒ Diferenças Finitas
 - ⇒ Representação Matricial e Inversa
 - ⇒ Métodos Diretos para Sistemas Lineares
 - ⇒ Linearização de Sistemas Não-Lineares
- **Fundamentos de Probabilidade e Estatística (2 ½ dias)**
 - ⇒ Introdução à Teoria da Probabilidade
 - ⇒ Probabilidade Condicional e Independência.
 - ⇒ Teoria das Variáveis Aleatórias.
 - ⇒ Vetores Aleatórios.
 - ⇒ Variáveis Aleatórias discretas.
 - ⇒ Variáveis Aleatórias contínuas.
 - ⇒ Soma de Variáveis Aleatórias.
 - ⇒ Estimação de Parâmetros.
 - ⇒ Análise de Dados Multivariados.

3. Geociências de Reservatórios para Engenheiros

- Fundamentos de Métodos Sísmicos
- Fundamentos de Petrofísica
- Fundamentos de Sedimentologia
- Fundamentos de Estratigrafia
- Fundamentos de Geologia Estrutural

4. Engenharia de Reservatórios para Geocientistas

- Fundamentos de Comportamento de Fluidos
- Fundamentos das Propriedades das Rochas na Engenharia
- Fundamentos de Interação Rocha-Fluido
- Fundamentos da Estática dos Fluidos
- Fundamentos da Dinâmica dos Fluidos