



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Geologia

Cleveland Maximino Jones

Avaliação do possível impacto das técnicas de MEOR (*Microbial Enhanced Oil Recovery*) no fator de recuperação das reservas de petróleo e gás do Brasil

Rio de Janeiro
2014

Cleveland Maximino Jones

Avaliação do possível impacto das técnicas de MEOR (*Microbial Enhanced Oil Recovery*) no fator de recuperação das reservas de petróleo e gás do Brasil

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Aquini Fernandes Chaves

Rio de Janeiro

2014

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

J762 Jones, Cleveland Maximino.
Avaliação do possível impacto das técnicas de MEOR
(Microbial Enhanced Oil Recovery) no fator de recuperação
das reservas de petróleo e gás do Brasil / Cleveland
Maximino Jones. – 2014.
441 f. il.

Orientador: Hernani Aquini Fernandes Chaves.
Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Geologia.
Bibliografia.

1. Petróleo - Geologia - Brasil – Teses. 2. Petróleo –
Microbiologia - Brasil - Teses. 3. Indústria petrolífera –
Brasil – Teses. I. Chaves, Hernani Aquini Fernandes. II.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de
Geologia. III. Título.

CDU 553.982(81)

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial
desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Cleveland Maximino Jones

Avaliação do possível impacto das técnicas de MEOR (*Microbial Enhanced Oil Recovery*) no fator de recuperação das reservas de petróleo e gás do Brasil

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias.

Aprovado em 25 de abril de 2014.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Hernani Aquini Fernandes Chaves (Orientador)
Faculdade de Geologia – UERJ

Prof. Dr. Paulo Fernando de Almeida
Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. Paulo Roberto Schroeder Johann
Petrobras

Prof.^a Dra. Marcia Marques
Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente-UERJ

Prof. Dr. Rodolfo Dino
Faculdade de Geologia – UERJ

Prof.^a Dra. Maria Antonieta da C. Rodrigues (suplente)
Faculdade de Geologia – UERJ

Rio de Janeiro
2014

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Professores, Pesquisadores e Instituições:

Ao meu orientador, Prof. Hernani Aquini Fernandes Chaves, pela confiança depositada em mim. Sua rica carreira, ampla experiência multidisciplinar, e profundo conhecimento sobre os mais variados temas envolvendo os recursos energéticos e as ferramentas de análise para seu estudo me inspiraram a perseverar e concluir este trabalho.

Ao Professor Paulo Almeida, da UFBA, com quem tive a oportunidade de desenvolver um projeto de pesquisa em MEOR, que acabou sendo fundamental para a própria evolução deste trabalho;

Ao Professor Carlos Alfredo Galindo Blaha, da UFRN, quem forneceu o consórcio microbiano usado nos ensaios realizados;

Ao Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello, da Petrobras, e ao Dr. Eugênio André Campagnolo, que forneceram quatro das amostras utilizadas nos ensaios;

Ao Prof. Sergio Bergamaschi, por ceder duas das amostras utilizadas nos ensaios, e por suas orientações para a descrição das lâminas petrográficas das amostras;

À Weatherford Laboratories; ao Sr. Andrew Rolinson, Country Unit Business Manager; ao Sr. Eric N. Huseth, Regional Business Unit Manager; ao Sr. Kevin Jacques, Special Core Analysis Manager; e ao Sr. David Bentes, Special Core Analysis Supervisor, pela autorização e realização dos ensaios com as amostras, nos laboratórios da Weatherford em Xerém, Duque de Caxias;

Ao Departamento de Biofísica e Biometria, Instituto de Biologia Roberto Alcantara Gomes, da UERJ e ao Prof. Heitor Evangelista, coordenador do seu Laboratório de Radioecologia e Mudanças Globais, por ter cedido o laboratório; e ao Prof. Marcio Cataldo, por ter realizado os procedimentos para o preparo do consórcio microbiano utilizado nos ensaios;

Ao Observatório Nacional e ao Prof. Giovanni Stael, coordenador de seu Laboratório de Petrofísica, por ter cedido o laboratório e realizado a adequação das amostras utilizadas nos ensaios;

Ao Laboratório Geológico de Preparação de Amostras da Faculdade de Geologia da UERJ, pelo preparo das amostras utilizadas nos ensaios, e das respectivas lâminas petrográficas;

Aos Professores René Rodrigues, Egberto Pereira e Sergio Bergamaschi, e aos demais professores da Faculdade de Geologia, com quem tive oportunidade de discutir meu trabalho e receber orientações valiosas;

A Luis Henrique da Silva Barcelos, biólogo, por sua ajuda no recebimento, conservação e preparo do consórcio microbiano usado nos ensaios realizados;

Ao Professor Marco André Malmann Medeiros, por suas sugestões objetivas;

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de doutorado, de vital importância durante a elaboração de minha tese;

À UERJ, que em seu espaço acadêmico proporcionou tantas oportunidades de trocas de informações e ideias, com docentes e discentes de vários departamentos e faculdades, pois essas interações foram importantes no desenvolvimento e aprimoramento de meu trabalho;

Aos membros da banca, Prof. Dr. Paulo Fernando de Almeida, Dr. Paulo Roberto Schroeder Johann, Prof.^a Dra. Marcia Marques Gomes, Prof. Dr. Rodolfo Dino, e Prof.^a Dra. Maria Antonieta da C. Rodrigues (suplente), que dedicaram tempo e esforço à leitura da tese, e ao processo de avaliação como membros da banca de defesa desta tese.

E aos demais profissionais, que mesmo não sendo individualmente identificados, de alguma forma me ajudaram a alcançar este marco no meu histórico acadêmico.

Agradecimentos Pessoais:

Ao Professor José Diamantino de Almeida Dourado, que não somente me iniciou nesta caminhada, como também sempre esteve presente para ajudar de todas as formas;

Ao Professor Julio Nichioka, pelo seu incentivo;

À minha esposa, Vanda, por seu firme estímulo para concluir este trabalho;

A meus pais e à minha família, cujos exemplos de retidão sempre balizaram minha vida e meus projetos profissionais;

Ao meu avô, Louis Cleveland Jones, um verdadeiro homem renascentista, cujas expressivas conquistas foram exemplos desafiadores e inspiradores.

Nasci para consagrar-me às letras e às ciências....Não conheço missão maior e mais nobre que a de dirigir as inteligências jovens e preparar os homens do futuro.

Dom Pedro II (Pedro de Alcântara João Carlos Leopoldo Salvador Bibiano Francisco Xavier de Paula Leocádio Miguel Gabriel Rafael Gonzaga) (1825 – 1891), Imperador do Brasil, governante sábio, benevolente, austero, honesto, sem apego ao poder, político liberal, defensor da liberdade da imprensa e da soberania brasileira, hábil negociador diplomático, abolicionista, poliglota, ecologista, patrono das artes e da cultura, criador do Instituto Histórico e Geográfico Brasileiro, fundador do Colégio Pedro II, financiador do Instituto Pasteur (França), astrônomo, membro da Royal Society (Reino Unido), da Academia de Ciências da Rússia, das Reais Academias de Ciências e Artes da Bélgica, da American Geographical Society (EUA), e da Académie des Sciences (França), admirador do empreendedorismo e da iniciativa privada, e grande incentivador das inovações tecnológicas e de sua rápida incorporação prática, em benefício da sociedade.

RESUMO

JONES, Cleveland Maximino. *Avaliação do possível impacto das técnicas de MEOR (Microbial Enhanced Oil Recovery) no fator de recuperação das reservas de petróleo e gás do Brasil*. 2014. 441f. Tese (Doutorado em Geologia) - Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Os métodos tradicionais de estimular a produção de petróleo, envolvendo a injeção de água, vapor, gás ou outros produtos, estabeleceram a base conceitual para novos métodos de extração de óleo, utilizando micro-organismos e processos biológicos. As tecnologias que empregam os processos de bioestimulação e bioaugmentação já são amplamente utilizadas em inúmeras aplicações industriais, farmacêuticas e agroindustriais, e mais recentemente, na indústria do petróleo. Dada a enorme dimensão econômica da indústria do petróleo, qualquer tecnologia que possa aumentar a produção ou o fator de recuperação de um campo petrolífero gera a expectativa de grandes benefícios técnicos, econômicos e estratégicos. Buscando avaliar o possível impacto de MEOR (*microbial enhanced oil recovery*) no fator de recuperação das reservas de óleo e gás no Brasil, e quais técnicas poderiam ser mais indicadas, foi feito um amplo estudo dessas técnicas e de diversos aspectos da geologia no Brasil. Também foram realizados estudos preliminares de uma técnica de MEOR (bioacidificação) com possível aplicabilidade em reservatórios brasileiros. Os resultados demonstram que as técnicas de MEOR podem ser eficazes na produção, solubilização, emulsificação ou transformação de diversos compostos, e que podem promover outros efeitos físicos no óleo ou na matriz da rocha reservatório. Também foram identificadas bacias petrolíferas brasileiras e recursos não convencionais com maior potencial para utilização de determinadas técnicas de MEOR. Finalmente, foram identificadas algumas técnicas de MEOR que merecem maiores estudos, entre as técnicas mais consolidadas (como a produção de biossurfatantes e biopolímeros, e o controle da biocorrosão), e as que ainda não foram completamente viabilizadas (como a gaseificação de carvão, óleo e matéria orgânica; a dissociação microbiana de hidratos de gás; a bioconversão de CO₂ em metano; e a bioacidificação). Apesar de seu potencial ainda não ser amplamente reconhecido, as técnicas de MEOR representam o limiar de uma nova era na estimulação da produção de recursos petrolíferos existentes, e até mesmo para os planos de desenvolvimento de novas áreas petrolíferas e recursos energéticos. Este trabalho fornece o embasamento técnico para sugerir novas iniciativas, reconhecer o potencial estratégico de MEOR, e para ajudar a realizar seu pleno potencial e seus benefícios.

Palavras chave: Recuperação avançada de óleo. MEOR. BEOR. Microbiologia do petróleo. Bioacidificação.

ABSTRACT

JONES, Cleveland Maximino. *Assessment of the possible impact of MEOR (Microbial Enhanced Oil Recovery) techniques on the recovery factor of Brazilian oil and gas reserves*. 2014. 441f. Tese (Doutorado em Geologia) - Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

The traditional methods of stimulating production, involving the injection of water, steam, gas or other products, have established the conceptual basis for new methods of oil extraction, utilizing microorganisms and biological processes. Technologies that employ biostimulation and bioaugmentation processes are widely utilized in numerous industrial, pharmaceutical and agroindustrial applications, and, more recently, in the oil industry. Given the enormous economic dimension of the oil industry, any technology that can increase production or recovery of an oil field creates the expectation of large technical, economic and strategic benefits. In order to assess the possible impact of MEOR (Microbial Enhanced Oil Recovery) on the recovery factor of oil and gas reserves in Brazil, and which techniques might be most indicated, a wide ranging study of those techniques and of various aspects of the geology of Brazil was carried out. Preliminary studies of a MEOR technique (bioacidification) with possible application in Brazilian reservoirs were also carried out. The results demonstrate that MEOR techniques can be effective in the production, solubilization, emulsification or transformation of several compounds, and that they can promote other physical effects in the oil or the reservoir rock matrix. Brazilian oil basins and unconventional resources with potential for utilization of certain MEOR techniques were also identified. Finally, certain MEOR techniques that deserve further studies were identified, involving both more consolidated techniques (such as biosurfactant and biopolymer production, and the control of microbially induced corrosion), as well as those that have not yet fully proven their viability (such as coal, oil and organic matter gasification; microbial dissociation of gas hydrates; bioconversion of CO₂ into methane; and bioacidification). Despite the fact that their potential is not yet fully recognized, MEOR techniques represent the dawn of a new era in the stimulation of production of existing oil resources, and even in the production development plans of new oil and other energy resources. This work furnishes the technical basis for suggesting new initiatives, for recognizing the strategic potential of MEOR, and for helping to realize the full potential of MEOR and its benefits.

Keywords: Enhanced oil recovery. MEOR. BEOR. Petroleum microbiology. Bioacidification.

RESUMEN

JONES, Cleveland Maximino. *Evaluación del posible impacto de las técnicas de MEOR (Microbial Enhanced Oil Recovery) en el factor de recuperación de las reservas de petróleo y gas del Brasil*. 2014. 441f. Tese (Doutorado em Geologia) - Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Los métodos tradicionales para estimular la producción, a través de la inyección de agua, vapor, gas u otros productos, establecieron la base conceptual para nuevos métodos de extracción de petróleo, utilizando microorganismos y procesos biológicos. Las tecnologías que emplean los procesos de bioestimulación y bioaumentación son ampliamente utilizadas en inúmeras aplicaciones industriales, farmacéuticas y agroindustriales, y, más recientemente, en la industria del petróleo. Dada la enorme dimensión económica de la industria del petróleo, cualquier tecnología que pueda aumentar la producción o el factor de recuperación de un campo petrolífero engendra la expectativa de grandes beneficios técnicos, económicos y estratégicos. Buscando evaluar el posible impacto de MEOR (*microbial enhanced oil recovery*) en el factor de recuperación de las reservas de petróleo y gas en Brasil, y cuales técnicas podrían ser más indicadas, fue hecho un amplio estudio de esas técnicas e de diversos aspectos de la geología en Brasil. También fueron realizados estudios preliminares de una técnica de MEOR (bioacidificación) con posible aplicabilidad en reservorios brasileños. Los resultados demuestran que las técnicas de MEOR pueden ser eficaces en la producción, solubilización, emulsificación o transformación de varios compuestos, y que pueden inducir otros efectos físicos en el petróleo o en la matriz de la roca reservorio. También fueron identificadas cuencas petrolíferas brasileñas y recursos no convencionales con más potencial para utilización de determinadas técnicas de MEOR. Finalmente, fueron identificadas algunas técnicas de MEOR que merecen más estudios, entre técnicas más consagradas (como la producción de biosurfactantes y biopolímeros, y el control de la biocorrosión), y las que todavía no fueron completamente viabilizadas (como la gasificación del carbón, petróleo y materia orgánica; la disolución microbiana de hidratos de gas; la bioconversión del CO₂ en metano; y la bioacidificación). A pesar de que su potencial todavía no es ampliamente reconocido, las técnicas de MEOR representan una nueva era en la estimulación de la producción de recursos petrolíferos existentes, y hasta mismo para los planos de desarrollo de nuevas áreas petrolíferas y de otros recursos energéticos. Este trabajo proporciona la fundamentación técnica para sugerir nuevas iniciativas, reconocer el potencial estratégico de MEOR, y para ayudar a alcanzar su pleno potencial y sus beneficios.

Palabras clave: Recuperación avanzada de petróleo. MEOR. BEOR. Microbiología del petróleo. Bioacidificación.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Descrição das curvas de saturação de água e óleo durante a drenagem e imbibição.....	35
Figura 2	- Formação de cones de água ou gás, quando a produção se dá em uma vazão demasiadamente elevada.....	40
Figura 3	- Injeção de água ou gás em um reservatório sob um regime de produção com recuperação secundária.....	41
Figura 4	- Nova concepção da classificação das formas de produção.....	43
Figura 5	- Comportamento teórico das descobertas de campos de uma determinada classe de tamanho, em uma área exploratória.....	48
Figura 6	- As descobertas e a produção de petróleo convencional, em nível mundial.....	52
Figura 7	- A diferença entre as adições e a produção mundial de petróleo.....	52
Figura 8	- Projeções para a produção e demanda de petróleo no Brasil, para os próximos anos.....	54
Figura 9	- Área exploratória disponível para as operadoras no Brasil, por rodada.....	56
Figura 10	- Fundación Instituto de Estudios Avanzados (IDEA), do Ministério de Ciência e Tecnologia da Venezuela, em Caracas, Venezuela.....	62
Figura 11	- Comportamento da viscosidade de três tipos de óleo pesado.....	75
Figura 12	- Frente de deslocamento típica de métodos contínuos de injeção de calor ou produtos para estimular a produção com recuperação terciária.....	76
Figura 13	- Frente de deslocamento típica de métodos cíclicos de injeção de calor ou produtos para estimular a produção com recuperação terciária.....	76
Figura 14	- A molhabilidade de um líquido medida pelo ângulo de contato com uma superfície sólida.....	81
Figura 15	- Efeito na molhabilidade, da adição de um produto miscível com o óleo.....	81

Figura 16	- Diagrama ternário esquemático do comportamento de três compostos.....	83
Figura 17	- Diagrama de fases para o CO ₂	85
Figura 18	- Efeito da concentração de um surfatante numa mistura de água com óleo.....	89
Figura 19	- Alguns exemplos do tipo de estrutura que os polímeros podem assumir.....	91
Figura 20	- Ilustração do equilíbrio de carbonatos.....	95
Figura 21	- Produtos de PCR vistos após eletroforese.....	120
Figura 22	- Ilustração do método de visualização FISH de diferentes micro-organismos em três conjuntos microbianos.....	123
Figura 23	- Sequência de passos para a análise e seleção de determinados micro-organismos.....	129
Figura 24	- Populações microbianas antes e depois da bioaumentação.....	138
Figura 25	- Ilustração das regiões onde micro-organismos individuais, bioflocos e biofilmes podem crescer.....	143
Figura 26	- Processo de formação de bioflocos, que eventualmente se transformam em biofilme.....	144
Figura 27	- Custo de produção (em US\$/tonelada) de diferentes biopolímeros, de acordo com as matérias primas empregadas em diferentes países.....	165
Figura 28	- Resultados da injeção de um produto da DuPont, contendo micro-organismos nativos e inoculados, no sistema de injeção de água de um reservatório.....	175
Figura 29	- Resultados de um tratamento com a técnica de MFD.....	176
Figura 30	- Histórico das taxas de corrosão e atividade microbiana no campo de Gullfaks (Mar do Norte).....	179
Figura 31	- Descrição dos possíveis mecanismos operantes na técnica de MEOR que utiliza o nitrato como forma de inibir o crescimento de BRS.....	180
Figura 32	- Ilustração dos processos e dos elementos envolvidos na MIC.....	183

Figura 33	- Redução da tensão interfacial (IFT) observada em um sistema contendo óleo, água e micro-organismos.....	186
Figura 34	- Ilustração esquemática dos processos de degradação envolvidos na bioconversão do carvão em metano.....	201
Figura 35	- Diferentes estruturas microscópicas de cristais de rochas carbonáticas.....	210
Figura 36	- Exemplo do resultado hipotético que se poderia esperar através do efeito da bioacidificação.....	212
Figura 37	- Bacias sedimentares brasileiras por tipo e período de formação.....	226
Figura 38	- Produção, consumo e importação de petróleo pelo Brasil, de 1955 a 1985.....	229
Figura 39	- Evolução da dependência externa de petróleo no Brasil entre 1974 e 2012.....	230
Figura 40	- Sequência de descobertas nas bacias de Santos, Campos e Espírito Santo, por período e profundidade.....	231
Figura 41	- Tela de resultado da ferramenta GeoX®, para as acumulações recuperáveis a serem descobertas (<i>yet-to-find-oil</i>) na região do pré-sal.....	235
Figura 42	- Tela de resultado da ferramenta GeoX®, para o tamanho individual das acumulações recuperáveis esperadas na região do pré-sal.....	236
Figura 43	- A Bacia do Recôncavo.....	244
Figura 44	- Seção geológica da Bacia do Recôncavo.....	245
Figura 45	- Seções geológicas das sub-bacias de Sergipe e Alagoas..	247
Figura 46	- Infraestrutura da região da Bacia de Sergipe-Alagoas.....	248
Figura 47	- A Bacia Potiguar.....	250
Figura 48	- Mapa geológico da Bacia Potiguar.....	251
Figura 49	- Seção geológica da Bacia Potiguar.....	252
Figura 50	- Seção geológica esquemática da Bacia de Campos.....	254
Figura 51	- Seção geológica N-S representativa da Bacia de Santos...	257
Figura 52	- Mapa da Bacia do Espírito Santo.....	260
Figura 53	- Jazidas de carvão mineral do sul do Brasil.....	264

Figura 54	- Modelo proposto para a formação dos carbonatos do pré-sal na Bacia de Santos.....	265
Figura 55	- Afloramentos de folhelhos betuminosos no Brasil.....	271
Figura 56	- Detalhe estratigráfico do Grupo Passa Dois.....	272
Figura 57	- Amostras (duas cada) fornecidas pela Petrobras, de duas rochas de diferentes reservatórios não identificados individualmente, na Bacia de Campos.....	282
Figura 58	- Amostras fornecidas pela FGEL.....	283
Figura 59	- Redimensionamento das amostras da FGEL com uma plugadeira.....	284
Figura 60	- Detalhe de ferramenta de corte para redimensionamento de plugues.....	285
Figura 61	- Corte de plugues para assegurar uma face perfeitamente perpendicular ao seu comprimento.....	286
Figura 62	- Faceamento de plugues para assegurar uma superfície lisa.....	286
Figura 63	- Preparo das amostras da Petrobras.....	287
Figura 64	- Procedimentos relativos ao consórcio microbiano utilizado	291
Figura 65	- Esquema do protocolo para os testes realizados nas amostras.....	292
Figura 66	- Exemplo de permeâmetro e sistema de controle e medição acoplado, da Core Laboratories.....	293
Figura 67	- Sistema de fixação de amostras no cilindro do permeâmetro.....	294
Figura 68	- Arranjo do sistema de contenção da amostra dentro do permeâmetro.....	294
Figura 69	- Equipamento de polimento de lâminas petrográficas.....	298
Figura 70	- Ilustração do processo de preparo das lâminas petrográficas.....	299
Figura 71	- Lâminas petrográficas preparadas.....	300
Figura 72	- Microscópio da FGEL/UERJ utilizado para observar as lâminas petrográficas.....	301
Figura 73	- Gráfico ilustrando a tendência de recuperação da permeabilidade das amostras.....	303
Figura 74	- Processo de inibição de bioflocos e biofilmes.....	305

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Exemplos de compêndios publicados sobre técnicas de MEOR aplicadas.....	147
Tabela 2	- Exemplos de trabalhos publicados sobre avaliação e métodos de priorização de técnicas de MEOR a serem empregadas.....	151
Tabela 3	- Classificação dos biossurfatantes segundo as linhagens dos diferentes micro-organismos produtores conhecidos....	187
Tabela 4	- Relação e descrição das principais técnicas de MEOR descritas na literatura.....	214
Tabela 5	- Importações, exportações e saldo volumétrico e financeiro das correntes de petróleo, gás natural (incluindo GNL) e derivados de petróleo, entre os anos 2006 e 2012.....	233
Tabela 6	- Compilação de informações sobre os reservatórios em alguns dos principais campos petrolíferos brasileiros.....	239
Tabela 7	- Compilação de informações sobre os principais recursos não convencionais encontrados em algumas das principais bacias sedimentares que reúnem esses recursos no Brasil.....	242
Tabela 8	- Planilha com resultados dos ensaios realizados pela Weatherford Laboratories.....	302
Tabela 9	- Descrição dos diversos parâmetros analisados para as lâminas petrográficas das amostras sem tratamento, e após 10 ou 20 dias de tratamento com consórcio microbiano.....	306

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- AOR – *Additional Oil Recovery* (óleo adicional recuperado)
- API – *American Petroleum Institute* (Instituto de Petróleo dos EUA)
- ASP – *Alkali-Surfactant-Polymer* (produtos alcalinos, surfatantes e polímeros)
- bbl – Barril
- Bbbbl – Bilhões de barris
- Bcf – Bilhões de pés cúbicos
- BCX – *Biocompetitive Exclusion* (exclusão biocompetitiva)
- BDS – Bio-dessulfurização
- BEOR – *Biological Enhanced Oil Recovery* (recuperação avançada de óleo por meios biológicos)
- BET – *Biocompetitive Exclusion Technology* (tecnologia de exclusão biocompetitiva)
- boe – Barris de óleo equivalente
- BRN – Bactérias redutoras de nitrato
- BOS – *Biological Oil Stimulation* (estimulação biológica de óleo)
- BP – British Petroleum
- bpd – Barris por dia
- BRS – Bactérias redutoras de sulfato
- Capex – *Capital Expenditure* (despesas de capital, ou de investimento)
- Cenpes – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (da Petrobras)
- cf – Pés cúbicos
- CHOPS – *Cold Heavy Oil Production with Sand* (sistema de produção de óleo pesado via produção com areia)
- CIPR – Centre for Integrated Petroleum Research (Noruega)
- CNP – Conselho Nacional do Petróleo
- COT – Teor de carbono orgânico total (Carbono Orgânico Total)
- CVM – Comissão de Valores Mobiliários
- CSS – *Cyclic Steam Stimulation* (estimulação cíclica com vapor)
- DBO – Demanda bioquímica de oxigênio
- DEIN – Departamento de Engenharia Industrial da UERJ
- DGGE – *Denaturing Gradient Gel Electrophoresis* (eletroforese em gel com gradiente de desnaturantes)
- DOE – *Department of Energy* (Departamento de Energia dos EUA)
- DQO – Demanda química de oxigênio
- DTI – *Department of Trade and Industry* (Departamento da Indústria e Comércio do Reino Unido)
- EIA – *Energy Information Administration* (Secretaria (federal) de Informação sobre Energia dos EUA)
- EOR – *Enhanced Oil Recovery* (recuperação avançada de óleo)
- ETE – Estação de tratamento de efluentes

- EUA – Estados Unidos da América do Norte
- FAME – *Fatty Acid Methyl Ester Analysis* (análise de ácidos graxos)
- FEN – Faculdade de Engenharia da UERJ
- Fm – Formação (geológica)
- FISH – *Fluorescent In Situ Hybridization* (hibridização fluorescente *in situ*)
- FR – Fator de recuperação
- Gb – Giga barris de petróleo (trilhões de barris)
- GLP – Gás liquefeito de petróleo, que é uma mistura de hidrocarbonetos saturados e não saturados, com até cinco átomos de carbono, utilizado como combustível doméstico
- GNL – Gás Natural Liquefeito
- GOM – *Gulf of Mexico* (Golfo do México)
- Gr – Grupo (geológico)
- HIC – *Hydrogen Induced Cracking* (corrosão por rachaduras induzidas pela formação de hidrogênio)
- IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo
- IOC – *International Oil Company* (empresa internacional de petróleo)
- IOR – *Improved Oil Recovery* (recuperação melhorada de óleo)
- JIP – *Joint Industry Project* (projeto conjunto da indústria do petróleo)
- km – Quilômetro
- km² – Quilômetros quadrados
- KMS – *Knowledge Management System* (sistema de gestão do conhecimento)
- LGNs – Líquidos de gás natural, que são hidrocarbonetos leves, produzidos juntamente com gás natural, que se condensam a temperaturas e pressões normais
- m² – Metros quadrados
- m³ – Metros cúbicos
- Ma – Milhões de anos
- Mbbl – Milhares de barris
- Mboe – Milhares de barris de óleo equivalente
- Mbpd – Milhares de barris por dia
- Mcf – Milhares pés cúbicos
- Md – milidarcy (1 darcy = 1x10⁻¹² m²)
- MEOR – *Microbial Enhanced Oil Recovery* (recuperação avançada de óleo por meios microbiológicos)
- MFD – *Microbial Flow Diversion* (desvio microbiano do fluxo)
- MIC – *Microbially Induced Corrosion* ou *Microbially Influenced Corrosion* (corrosão induzida microbiologicamente)
- MMbbl – Milhões de barris
- MMboe – Milhões de barris de óleo equivalente
- MMcf – Milhões de pés cúbicos
- MMcfpd – Milhões de pés cúbicos por dia
- MMcmd – Milhões de metros cúbicos por dia
- MMm³ – Milhões de metros cúbicos
- MMscfd – Milhões de pés cúbicos padrão por dia

MSI	–	Monitoramento seletivo da informação
MTS	–	<i>Microbial Transport Simulator</i> (simulador de transporte microbiano)
mWS	–	<i>microscopic Water Sweep</i> (varrido em escala microscópica)
MWS	–	<i>Macroscopic Water Sweep</i> (varrido em escala macroscópica)
NEPRO	–	Núcleo de Estudos de Engenharia de Produção
NOC	–	<i>National Oil Company</i> (empresa nacional de petróleo)
NR-SOB	–	<i>Nitrate Reducing-Sulfide-Oxidizing Bacterial</i> (bactérias redutoras de nitrato e oxidantes de sulfeto)
NRB	–	<i>Nitrate Reducing Bacteria</i> (bactérias redutoras de nitrato)
OIIP	–	<i>Oil Initially In Place</i> (petróleo na jazida)
ONU	–	Organização das Nações Unidas
OOIP		<i>Original Oil In Place</i> (óleo originalmente presente na jazida)
OPEC	–	<i>Organization of Petroleum Exporting Countries</i> (Organização dos Países Exportadores de Petróleo)
OPEP	–	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
Opex	–	<i>Operational Expenditure</i> (despesas operacionais)
OSA	–	<i>Operating Service Agreements</i> (contratos operacionais de serviços)
OSC	–	<i>Oilfield Services Companies</i> (empresa de serviços para a indústria do petróleo)
P&D	–	Pesquisa e Desenvolvimento
PCR	–	<i>Polymerase Chain Reaction</i> (reação em cadeia assistida por polimerase)
PDVSA	–	Petróleo de Venezuela S/A
Petróleo bruto	–	Petróleo bruto, incluindo LGNs
Petróleo leve	–	Petróleo bruto com grau API maior que 27°
Petróleo pesado	–	Petróleo bruto com grau API menor ou igual a 27°
PIB	–	Produto Interno Bruto
PL	–	Projeto de Lei
PRAVAP	–	Programa de Recuperação Avançada de Petróleo, da Petrobras
prob	–	Estimativa de probabilidades
PSC	–	<i>Production Sharing Contract</i> (contrato de partilha da produção)
PWRI	–	<i>Produced Water Reinjection</i> (reinação de água produzida)
RGO	–	Razão gás-óleo
R/P	–	Relação reservas/produção
SAGD	–	<i>Steam Assisted Gravity Drainage</i> (sistema de produção de óleo pesado via injeção de vapor e drenagem inferior)
SCO	–	<i>Synthetic Crude Oil</i> (óleo cru sintético)
SEAL	–	Bacia de Sergipe-Alagoas
SEC	–	<i>Securities and Exchange Commission</i> (Comissão de Títulos e Câmbio dos EUA, equivalente à CVM brasileira)
S _{or}	–	Saturação residual do óleo
SRB	–	<i>Sulfate Reducing Bacteria</i> (bactérias redutoras de sulfato)
SPE	–	<i>Society of Petroleum Engineers</i> (Sociedade dos Engenheiros de Petróleo dos EUA)

- SSC – *Sulfide Stress Cracking* (corrosão por rachaduras induzidas pelo sulfeto)
- TEB – Tecnologia de Exclusão Biocompetitiva
- TGGE – *Temperature Gradient Gel Electrophoresis* (eletroforese em gel com gradiente de temperatura)
- UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UKCS – *UK Continental Shelf* (plataforma continental do Reino Unido)
- UCG – *Underground Coal Gaseification* (gaseificação subterrânea de carvão)
- UN – *United Nations* (Organização das Nações Unidas)
- URR – *Ultimate Recoverable Reserves* (reservas eventualmente recuperáveis)
- USGS – *United States Geologic Service* (Serviço Geológico dos EUA)
- VPL – Valor Presente Líquido
- WPC – *World Petroleum Council* (Conselho Mundial do Petróleo)

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	22
1	- ESTÁGIO ATUAL DA E&P DE PETRÓLEO E GÁS	34
1.1	- Produção dos Recursos Petrolíferos	34
1.2	- Modelagem Multifásica de um Reservatório	34
1.3	- Escoamento do Óleo	35
1.4	- Visão Tradicional dos Métodos de Produção	37
1.4.1	- <u>Recuperação Primária</u>	38
1.4.2	- <u>Recuperação Secundária</u>	40
1.4.3	- <u>Recuperação Terciária (Recuperação Avançada)</u>	41
1.5	- Novos Paradigmas	42
1.5.1	- <u>Recuperação Convencional</u>	43
1.5.2	- <u>Recuperação Não Convencional</u>	44
1.6	- A Teoria do Processo Exploratório dos Recursos Petrolíferos	46
1.7	- Descobertas Passadas e Futuras de Recursos Petrolíferos	50
1.8	- A Situação Exploratória no Brasil	53
1.9	- Programas Tecnológicos para Melhorar o Fator de Recuperação	56
1.9.1	- <u>Propes - Programa Tecnológico de Óleos Pesados Offshore</u>	56
1.9.2	- <u>Pravap - Programa de Recuperação Avançada de Petróleo</u>	57
1.9.3	- <u>Recage - Programa de Revitalização de Campos com Alto Grau de Exploração</u>	58
1.9.4	- <u>Outros Programas</u>	59
2	- RECUPERAÇÃO AVANÇADA DE ÓLEO – EOR	63
2.1	- Os Fatores que Impulsionam EOR	63
2.2	- Objetivos	66
2.3	- Campos Marginais	68
2.4	- Dificuldades	69
2.5	- Técnicas de Recuperação Avançada Atualmente Empregadas	72
2.5.1	- <u>Métodos Térmicos</u>	74
2.5.2	- <u>Métodos Miscíveis</u>	79
2.5.3	- <u>Métodos Químicos</u>	87
2.5.4	- <u>Outros Métodos</u>	97
2.6	- Compilações Históricas e Sistemas de Otimização de Aplicação das Técnicas de EOR	99
2.7	- Considerações Estratégicas e Geopolíticas	100
3	- MICROBIOLOGIA	104

3.1	- Processos Biológicos – Nosso Desconhecimento	104
3.2	- Os Agentes dos Processos Biológicos	106
3.2.1	- <u>Os Extremófilos</u>	108
3.3	- Biomímica	110
3.4	- Ferramentas da Microbiologia	111
3.4.1	- <u>Ferramentas de Cultura, Isolamento e Identificação</u>	111
3.4.2	- <u>Ferramentas Genéticas</u>	114
3.4.3	- <u>Metagenômica</u>	125
3.4.4	- <u>Bibliotecas da Genética</u>	131
3.5	- Processos Biológicos em MEOR	133
3.5.1	- <u>Histórico</u>	133
3.5.2	- <u>Bioestimulação versus Bioaugmentação</u>	135
3.6	- Microbiologia do Petróleo	142
4	- MEOR – MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY	145
4.1	- Estado da Arte	146
4.1.1	- <u>Compilação de Estudos Prévios sobre Técnicas de MEOR</u>	146
4.2	- Trabalhos Preparados para Publicação e Apresentação	152
4.2.1	- <u>Exclusão Biocompetitiva de BRS</u>	154
4.2.2	- <u>Produção Microbiana de Biossurfatantes para Aplicações em MEOR</u>	158
4.2.3	- <u>Produção Microbiana de Xantana para Aplicações em MEOR</u>	162
4.3	- Descrição de Algumas das Técnicas de MEOR	168
4.3.1	- <u>Biorremediação</u>	170
4.3.2	- <u>Produção de Biopolímeros</u>	171
4.3.3	- <u>Controle da Biocorrosão</u>	178
4.3.4	- <u>Produção de Biossurfatantes</u>	184
4.3.5	- <u>Controle de Parafinas</u>	188
4.3.6	- <u>Transformação <i>in situ</i> de Frações Pesadas do Óleo</u>	190
4.3.7	- <u>Biorrefino</u>	194
4.3.8	- <u>Emulsificação e Desemulsificação</u>	197
4.3.9	- <u>Gaseificação de Óleo <i>in situ</i></u>	197
4.3.10	- <u>Gaseificação de Carvão <i>in situ</i></u>	199
4.3.11	- <u>Bioconversão de CO₂ em Metano</u>	203
4.3.12	- <u>Dissociação Microbiana de Hidratos de Gás</u>	205
4.3.13	- <u>Bioacidificação</u>	208
4.4	- Compilação Própria de Estudos sobre Técnicas de MEOR	212

4.5	-	Dificuldades	216
4.6	-	Potencial Estratégico	221
4.7	-	Nova Abordagem para a Escolha de Técnicas de MEOR	223
5	-	GEOLOGIA REGIONAL BRASILEIRA E ESPECIFICIDADES DE POSSÍVEL INTERESSE PARA TÉCNICAS DE MEOR	225
5.1	-	Bacias Sedimentares Brasileiras	225
5.2	-	O Histórico dos Esforços Exploratórios Petrolíferos no Brasil	226
5.3	-	Esforços Exploratórios Atuais	236
5.4	-	Tipos de Reservatórios dos Principais Campos Brasileiros Descobertos	237
5.5	-	Acumulações Petrolíferas Convencionais e Recursos Não Convencionais no Brasil	243
5.5.1	-	<u>Bacia do Recôncavo</u>	243
5.5.2	-	<u>Bacia de Sergipe-Alagoas</u>	246
5.5.3	-	<u>Bacia Potiguar</u>	249
5.5.4	-	<u>Bacia de Campos</u>	253
5.5.5	-	<u>Bacia de Santos</u>	255
5.5.6	-	<u>Bacia do Espírito Santo</u>	259
5.5.7	-	<u>Bacia do Paraná</u>	262
5.5.8	-	<u>Reservatórios do Pré-Sal</u>	265
5.5.9	-	<u>Outras Bacias</u>	266
5.6	-	Acumulações com Potencial Não Convencional	267
5.6.1	-	<u>Folhelhos Betuminosos</u>	270
5.6.2	-	<u>Carvão</u>	273
5.7	-	Aspectos Geológicos dos Campos Petrolíferos e Recursos Não Convencionais Brasileiros de Interesse para MEOR	274
5.7.1	-	<u>Rochas Reservatório</u>	274
5.7.2	-	<u>Cimentação em Rochas de Reservatórios</u>	276
6	-	ENSAIOS PRELIMINARES PARA TESTAR UMA TÉCNICA DE MEOR POUCO ESTUDADA (BIOACIDIFICAÇÃO)	278
6.1	-	A Bioacidificação	278
6.2	-	Metodologia para Testar a Técnica de Bioacidificação	280
6.3	-	Descrição das Amostras Utilizadas	281
6.4	-	Consórcio Microbiano Utilizado	287
6.5	-	Método de Aplicação da Técnica de Bioacidificação Utilizada	291
6.6	-	Comportamento da Permeabilidade	293
6.7	-	Modificações Observadas nas Lâminas Petrográficas das Amostras	296

6.8	-	Resultados	302
6.8.1	-	<u>Permeabilidade</u>	302
6.8.2	-	<u>Análise de lâminas petrográficas</u>	305
7	-	DISCUSSÃO	308
7.1	-	MEOR Pode Melhorar o Fator de Recuperação ou Trazer Outros Benefícios à Indústria do Petróleo?	308
7.2	-	Quais Técnicas de MEOR São Mais Adequadas à Realidade Brasileira?	308
7.2.1	-	<u>Foco em Bacias Relativamente Maduras</u>	309
7.2.2	-	<u>Técnicas Voltadas para Recursos Não Convencionais</u>	311
7.3	-	Quais Técnicas de MEOR Merecem Mais Estudos?	312
7.3.1	-	<u>Foco em Técnicas Relativamente Consolidadas</u>	313
7.3.2	-	<u>Foco em Técnicas Pouco Estudadas</u>	316
7.4	-	Introdução de MEOR como Parte do toolbox da Indústria de Petróleo	323
7.5	-	Relevância Estratégica de MEOR	324
7.6	-	Outras Considerações	325
		CONCLUSÕES	328
		REFERÊNCIAS	331
		APÊNDICE A - Algumas empresas e instituições de biotecnologia aplicada com atividades na área de MEOR.....	384
		APÊNDICE B – Micro-organismos empregados em MEOR.....	385
		APÊNDICE C - Pôster apresentado na ISMOS4.....	387
		APÊNDICE D - Pôster apresentado na ISMOS4.....	389
		APÊNDICE E - Trabalho submetido para publicação em periódico da área de biotecnologia (no prelo)	391
		APÊNDICE F - Trabalho submetido para publicação em periódico da área de biotecnologia (no prelo).....	400
		APÊNDICE G - Trabalho sendo preparado para submissão em periódico a ser escolhido.....	411
		APÊNDICE H - Fotografias das lâminas petrográficas.....	423

INTRODUÇÃO

IDEIA

Uma tese de doutorado não é mais do que uma ideia. Esta tese de doutorado se baseia na ideia de que os processos microbiológicos que ocorrem na natureza, mesmo que não os compreendamos completamente, podem ser adaptados ou diretamente aproveitados na indústria do petróleo e gás para melhorar o fator de recuperação, a produção ou o desempenho das operações e intervenções envolvidas na exploração desses recursos minerais energéticos.

Principalmente, buscou-se apresentar evidências de que esses processos microbiológicos podem ser aplicados às bacias petrolíferas brasileiras, de uma forma estruturada, embasada em estudos que sugerem a melhor forma de utilizá-los, de acordo com as características individuais das bacias, dos hidrocarbonetos existentes, das rochas dos reservatórios que contêm esses recursos, e dos demais parâmetros que afetam a produção dessas bacias.

A ampla e complexa gama de processos físicos, químicos e biológicos, e dos diferentes efeitos inter-relacionados, que ocorrem nos reservatórios de petróleo e gás, além daqueles que agem nas instalações que fazem parte do conjunto produtivo, torna esse objetivo um trabalho desafiador. Mas o incentivo para que a presente tese aprofundasse esses estudos foi a convicção dos possíveis benefícios que uma melhor compreensão do tema poderá trazer para a indústria do petróleo, para as empresas, e para os países que adquiram maiores conhecimentos nessa área.

Apesar de abranger mais genericamente todas as aplicações que empregam processos biológicos ou microbiológicos no *upstream* e no *downstream* da indústria de petróleo e gás, chamamos o conjunto dessas técnicas de “tecnologia de recuperação avançada de óleo por meios biológicos” (BEOR - *Biological Enhanced Oil Recovery*), ou ainda, de forma mais usual, de “recuperação avançada de óleo por meios microbiológicos” (MEOR - *microbial enhanced oil recovery*). MEOR já se tornou um termo amplamente aceito, na nomenclatura padrão da indústria de

petróleo e gás, e doravante será usado para denominar essa tecnologia. Também são encontradas outras denominações semelhantes, como BOS (Estimulação Biológica de Óleo - *Biological Oil Stimulation*) e outras.

MOTIVAÇÃO

O tema desta tese tem sido acalentado pelo autor desde 1998, quando recém iniciava sua atuação como fundador de uma das primeiras empresas que atuavam na indústria de microbiologia aplicada à área de tratamento de efluentes e biorremediação, no Brasil. Como promulgador da bioaugmentação desde os primórdios dessa indústria no Brasil, na década de 1990, também foi natural o acompanhamento do surgimento do conceito da aplicação das técnicas da microbiologia e da bioaugmentação na indústria do petróleo, através dos primeiros contatos com experiências na França e nos Estados Unidos da América (EUA).

Posteriormente, o autor foi um dos coordenadores de um amplo projeto de monitoramento seletivo da informação (MSI), executado pelo Núcleo de Estudos de Engenharia de Produção (NEPRO), do Departamento de Engenharia Industrial (DEIN), da Faculdade de Engenharia (FEN), da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). O MSI se transformou numa importante ferramenta empresarial para a seleção, aquisição, estruturação, hierarquização e aplicação de informações, que dessa forma se transformam em inteligência corporativa, agregando valor à organização e fortalecendo sua produtividade e competitividade. O MSI é uma parte importante de um *knowledge management system* (KMS), atualmente reconhecido como peça essencial da gestão da informação de uma organização. Assimilar informações úteis e pertinentes, dentre um imenso e crescente universo de dados que circulam na internet e disponíveis em outros meios, é um desafio para qualquer organização que busque encontrar informações úteis e pertinentes para sua operação, nesse emaranhado de dados (JONES et al., 2003).

Como coordenador desse projeto, o autor foi responsável por três equipes de pesquisadores encarregados da pesquisa e elaboração de traduções e resenhas de

inúmeros artigos técnicos sobre diversos temas de interesse da contratante (Petrobras), incluindo alguns onde as técnicas biológicas e microbiológicas eram frequentemente fundamentais nas inovações relatadas. Esse foi o caso, por exemplo, dos temas “resíduos sólidos na indústria de petróleo”, “reuso da água na indústria do petróleo”, “monitoramento costeiro e oceânico”, “emissões atmosféricas na indústria de petróleo” e outros. Na produção de edições mensais com informações sobre desenvolvimentos recentes de elevada pertinência para diversas áreas de atuação da Petrobras, esses trabalhos também permitiram observar a crescente importância e aplicação de técnicas biológicas e microbiológicas na indústria do petróleo, envolvendo desde processos produtivos no *upstream* e *downstream*, a processos de contenção, remediação e mitigação de danos por poluição gerada pela indústria de petróleo, e até incluindo processos de monitoramento e outros, dentro dessa indústria (JONES et al., 2005).

No Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo e Gás Natural, oferecido através da FEN/UERJ, concluído pelo autor em 2007, o foco dos estudos também foi o desenvolvimento, as tendências e o potencial de MEOR na indústria de petróleo (JONES e ANSELMO, 2007).

Na literatura sobre o contexto energético mundial, diversos analistas têm comentado a perspectiva da inexorável tendência e necessidade de se explorar recursos em novas descobertas, cuja recuperação é cada vez mais difícil, enquanto os recursos já descobertos permanecem em grande parte sem ser extraídos, devido aos baixos valores do fator de recuperação atingidos atualmente. Hall (2003) lembra que o desenvolvimento da humanidade vem acompanhado de um crescente consumo energético per capita, que a torna vulnerável às limitações dos recursos disponíveis, pois as condições de economicidade vigentes não devem se manter indefinidamente. Essas limitações estão ligadas ao fato que novas descobertas de recursos serão mais onerosas financeiramente, energeticamente, politicamente e ambientalmente, de forma que a sociedade precisa investigar e apoiar formas inovadoras de suprir as necessidades energéticas do mundo. Nesse sentido, técnicas que permitam um melhor aproveitamento dos recursos já descobertos, como MEOR, se encaixam perfeitamente nessa visão, dada a necessidade de ampliar a base energética disponível para a humanidade.

Em relação ao potencial de MEOR, desde o início da década de 2000, muitos trabalhos e estudos foram publicados sobre suas técnicas e possíveis aplicações. Ainda assim, MEOR tem sido vista como uma tecnologia pouco compreendida e cujos resultados nem sempre foram os esperados, sugerindo que seus processos estão longe de serem dominados (MAUDGALYA et al., 2007). Lewis R. Brown, professor de microbiologia da Mississippi State University (EUA), que acompanha o desenvolvimento de MEOR há 40 anos, dizia, ainda em 2002, que apesar de ser bastante estudada, a tecnologia de MEOR ainda era muito subestimada em relação ao seu potencial para aumentar o fator de recuperação dos reservatórios de petróleo existentes no mundo (BROWN, 2002). A falta de uma melhor compreensão dos processos operantes nas diversas técnicas de MEOR não deve ofuscar seu potencial, mas sim estimular maiores esforços para entender seus mecanismos. Justamente por representar um interessante potencial e desafio ao mesmo tempo, o tema de MEOR chamou a atenção de muitos pesquisadores, assim como do autor.

Por outro lado, também ficaram claras as implicações geopolíticas e estratégicas das inovações tecnológicas na indústria do petróleo e gás. Não há mais petróleo fácil a ser explorado. A frase, hoje tida cada vez mais como verídica pelos observadores da indústria do petróleo e gás, reflete a experiência empírica dos últimos anos, das empresas que têm se dedicado à busca de novos recursos energéticos convencionais, para atender à crescente demanda por petróleo e gás no mundo. Novas acumulações significativas de recursos convencionais de petróleo e gás estão cada vez mais difíceis de serem encontradas, pois, como seria de se esperar, as maiores acumulações existentes no mundo teriam sido encontradas primeiro, restando, através dos anos, acumulações cada vez menores, ainda por serem encontradas¹.

As novas e significativas descobertas do pré-sal no Brasil, por exemplo, que incluem alguns dos maiores campos petrolíferos já descobertos, não representam uma verdadeira exceção à dificuldade de encontrar novas grandes acumulações de petróleo e gás, pois refletem a necessidade de orientar as novas buscas por recursos para fronteiras tidas até recentemente como regiões absolutamente inalcançáveis, com as tecnologias de exploração e exploração disponíveis.

¹ Ver uma descrição do conceito de *field size distribution* e *discovery sequence*, no Capítulo 1.

Dessa forma, maximizar o aproveitamento dos recursos já descobertos, ou seja, aumentar o fator de recuperação desses recursos é um objetivo revestido de implicações estratégicas para os países detentores de acumulações de hidrocarbonetos que ainda podem ser mais bem aproveitadas. Da mesma forma, para as empresas que exploram esses recursos, o domínio das técnicas de recuperação avançada de petróleo e gás, e especialmente das técnicas de MEOR, representa um fator estratégico para sua competitividade, semelhante ao que foi o domínio das técnicas de exploração e produção de petróleo em águas profundas.

JUSTIFICATIVA

A busca pela compreensão dos processos biológicos relacionados com a ocorrência de hidrocarbonetos, sua formação, degradação e demais processos que envolvem sua eventual produção, são objeto de estudo da microbiologia do petróleo, que já se tornou uma disciplina independente e atrai ampla atenção dos estudiosos da indústria do petróleo e gás.

As técnicas de MEOR representam o reconhecimento de que a biomímica (*biomimicry*) fornece importantes lições para o homem na sua busca por tornar mais eficiente o aproveitamento desses recursos energéticos existentes *in situ*. A biomímica analisa e estuda sistemas naturais para igualar ou superar suas características e desempenho, traduzindo esses processos para um processo da engenharia humana se assemelha aos naturais, e que pode solucionar problemas de forma mais eficaz, eficiente e sustentável do que as alternativas que ignoram os conceitos já existentes natureza. A natureza dispõe de um acúmulo de aprendizado muito vasto, adquirido através de processos evolutivos operantes por milhões e até centenas de milhões de anos. Frequentemente o homem ignora ou menospreza o valor desse conhecimento, acreditando que a inteligência humana pode criar ou recriar melhores soluções para determinados desafios da engenharia do que a natureza já encontrou em seu aparente trajeto aleatório de aperfeiçoamento, mas que tem sido muito eficiente (McGEE, 2006).

Dedicar esforços para encontrar e compreender mais profundamente as soluções de que a natureza dispõe pode resultar em novas soluções ou melhorias em processos de forma mais eficaz do que o uso de toda a engenhosidade humana sequer conseguiu imaginar (BENYUS, 2002). Esses ganhos poderiam ser auferidos se nos voltarmos para buscar entender e aplicar alguns dos processos microbiológicos muito eficientes, mas que vêm atuando sem nosso pleno conhecimento, tanto nas profundezas dos reservatórios de hidrocarbonetos, como na superfície da terra.

OBJETIVOS

Dada a ideia que fundamenta o presente trabalho, o principal objetivo desta tese é demonstrar que essa ideia é válida. Busca-se saber se, de fato, processos biológicos podem ser aplicados na indústria do petróleo para melhorar o fator de recuperação das reservas de óleo e gás.

Outros objetivos específicos foram colocados como hipóteses:

1. Demonstrar que tanto em acumulações convencionais de hidrocarbonetos (recursos convencionais), quanto nas acumulações não convencionais e métodos não convencionais de produção de hidrocarbonetos (recursos não convencionais), a aplicação de técnicas derivadas ou diretamente copiadas dos processos microbiológicos que ocorrem na natureza pode proporcionar grandes vantagens para aqueles que exploram esses recursos.
2. Com o presente trabalho se espera promover o reconhecimento do potencial de aplicação de MEOR, por parte dos *players* da indústria de energia, e especialmente pelos *players* da indústria de petróleo e gás (NOCs², IOCs³ e

² NOCs – Empresas de energia ou petróleo nacionais (*National Oil Companies*)

³ IOCs – Empresas de energia ou petróleo internacionais (*International Oil Companies*)

OSCs⁴), incluindo as empresas que exploram os recursos energéticos, assim como os governos que controlam os recursos energéticos nacionais. Sendo aceita essa realidade em relação ao potencial de MEOR, as técnicas de MEOR poderão alcançar mais facilmente seu pleno potencial para beneficiar não somente esses *players*, mas também as populações envolvidas, propiciando melhor aproveitamento dos recursos energéticos mundiais, com menos impactos ambientais negativos.

3. Identificar as técnicas de MEOR que podem ser consideradas mais adequadas à realidade brasileira e aos seus principais recursos petrolíferos convencionais e não convencionais, considerando as características de cada um.
4. Promover uma melhor compreensão da eficácia e do potencial de aplicação de uma técnica de MEOR denominada de bioacidificação. Se os resultados preliminares dos ensaios realizados demonstrarem que a bioacidificação tem potencial de se transformar em uma técnica de MEOR eficaz para determinados reservatórios brasileiros, serão justificados mais esforços de P&D no sentido de compreender melhor seu funcionamento e dominar sua aplicação. Caso contrário, será necessário estudar os resultados para ver se há motivos para prosseguir estudos dessa técnica com outras metodologias, ou se de fato ela não tem potencial imediato, dados os conhecimentos atuais.
5. Ajudar a tornar mais comum o uso das técnicas de MEOR na indústria do petróleo. Isso significa fazer das técnicas de MEOR uma parte integrante do *toolbox* da Indústria do Petróleo.
6. Identificar algumas técnicas de MEOR com maior potencial de desempenho, sejam elas técnicas relativamente consolidadas tecnicamente, ou ainda relativamente pouco estudadas.
7. Ajudar a difundir a compreensão da importância estratégica das técnicas de MEOR, tanto para empresas como para países detentores dessa tecnologia.

⁴ OSCs – Empresas de serviços para a indústria do petróleo (*oilfield services companies*)

METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a elaboração desta tese se baseou nos seguintes passos:

1. Revisão bibliográfica sobre MEOR - Foi realizado um amplo acompanhamento e busca dos trabalhos publicados em relação à tecnologia de MEOR, para entender o desenvolvimento histórico e tecnológico das técnicas de MEOR. Esse acompanhamento já vem sendo realizado pelo autor desde os anos 1990. O estudo dessas tendências permitiu consolidar o objetivo da tese, e forneceu inspiração para propor a aplicação de MEOR à produção de petróleo e gás em diferentes situações e em diferentes áreas de atuação da indústria de óleo e gás. Diversas técnicas de MEOR relatadas na literatura foram estudadas, buscando sugerir sua aplicação conforme uma hierarquia ditada pelas técnicas disponíveis, de acordo com os objetivos desejados, sua aplicabilidade e seu provável desempenho, como forma de apoio ao processo decisório em relação à otimização do aproveitamento dos recursos de óleo *in situ*.
2. Participação em diversos cursos, workshops e projetos de pesquisa e de desenvolvimento comercial de técnicas de MEOR - Também fizeram parte do processo de elaboração do presente trabalho a participação nessas iniciativas, incluindo o acompanhamento de perto de alguns projetos de empresas que vêm buscando transformar esses estudos em oportunidades de negócios.
3. Revisão da situação atual da indústria de óleo e gás – Foi feita uma revisão do estágio atual da E&P da indústria de petróleo e gás no mundo, para fornecer um arcabouço geral da indústria, das tecnologias, e dos fatores que impulsionam a adoção de novas tecnologias. Também foram estudadas as condicionantes da oferta e da demanda por recursos petrolíferos em nível mundial, e as implicações para a demanda por novas tecnologias que permitam um melhor aproveitamento dos recursos energéticos existentes e já descobertos.
4. Estudo aprofundado dos métodos de EOR – Os conceitos e a tecnologia que fundamentam os métodos de EOR atualmente empregados na indústria do petróleo representam uma base para a aplicação de diversas técnicas de MEOR,

portanto é imprescindível ter um arcabouço técnico relativamente completo e atual desses métodos.

5. Estudo aprofundado dos conceitos e das ferramentas da Microbiologia – É indiscutível a necessidade de conhecimentos e ferramental teórico multidisciplinar no estudo de MEOR e de suas técnicas, pois envolve conceitos e conhecimentos das áreas de diversas engenharias, da química, da física, da biologia e da microbiologia, incluindo as mais recentes tendências tecnológicas em cada uma dessas áreas. Dada a importância dos conceitos teóricos, das ferramentas utilizadas e dos avanços recentes da microbiologia para as técnicas de MEOR, foi fundamental incluir um embasamento teórico dessa disciplina e de suas principais ferramentas utilizadas no estudo e na aplicação das técnicas de MEOR.
6. Estudo dos aspectos da Geologia no Brasil, com possível relevância para a aplicação de MEOR – Um estudo das principais bacias petrolíferas e dos principais recursos energéticos no Brasil fundamentou a análise das características geológicas e outras, desses recursos, em relação à possível aplicabilidade de técnicas de MEOR nesses casos. Por outro lado, os estudos do Mestrado em Análise de Bacias e Faixas Móveis, realizado pelo autor, permitiu um melhor conhecimento da geologia regional das principais províncias petrolíferas brasileiras. Com o conhecimento das especificidades das principais acumulações dos recursos convencionais e não convencionais no Brasil, com a compreensão dos diversos tipos de técnicas de MEOR, e com o conhecimento dos tipos de problemas que elas podem ajudar a resolver, técnicas de MEOR com maior potencial puderam ser indicadas para determinadas condições.
7. Estudo preliminar de uma técnica de MEOR (bioacidificação) com possível aplicação em reservatórios no Brasil - Como forma de demonstrar o potencial de técnicas de MEOR que ainda não têm sido amplamente aplicadas ou estudadas, foram propostos ensaios para testar uma das técnicas, identificada como sendo promissora para certos tipos de reservatórios. No contexto de alguns dos principais reservatórios brasileiros, em que óleo pesado é encontrado em reservatórios carbonáticos, a técnica de bioacidificação foi testada em ensaios em laboratório, em amostras de reservatórios carbonáticos ou com cimentação carbonática. Buscou-se observar indícios de que essa técnica tem potencial para modificar favoravelmente certos parâmetros da rocha, como sua permeabilidade,

o que facilitaria a produção do óleo contido nesses tipos de rochas. A metodologia concebida envolve ensaios com essas amostras e consórcios microbianos compostos de cepas de micro-organismos que produzem CO₂ e ácidos orgânicos.

8. Apresentação dos resultados, das conclusões e das recomendações – Com o cruzamento das informações sobre as técnicas de MEOR, sobre as características das acumulações convencionais e não convencionais, e sobre os fatores que impulsionam a aplicação de técnicas de recuperação avançada de petróleo na indústria, foram apresentados resultados, conclusões e recomendações que devem servir para embasar decisões sobre o uso de técnicas de MEOR, para apontar novas iniciativas de P&D, e para alertar os diversos *players* da indústria sobre a importância estratégica de MEOR.

DESENVOLVIMENTO DA TESE

No Capítulo 1 é feito um apanhado do estágio atual da E&P de petróleo e gás no mundo. São discutidos os mecanismos de produção dos recursos petrolíferos, em sua visão tradicional e na visão mais recente; a teoria que governa o processo exploratório; as descobertas passadas e futuras de recursos petrolíferos; a situação exploratória no Brasil; e alguns dos programas tecnológicos atualmente desenvolvidos para melhorar o fator de recuperação na indústria de petróleo.

No Capítulo 2 é discutida a recuperação avançada de petróleo (EOR), os fatores por trás de sua crescente importância na indústria de petróleo e gás no mundo, algumas de suas técnicas empregadas atualmente, e algumas implicações do potencial de EOR.

No Capítulo 3 são apresentados os fundamentos da microbiologia, essenciais para entender os mecanismos de MEOR em suas diversas abordagens. São discutidos os processos biológicos em geral, como base para compreender os processos que ocorrem nos reservatórios de petróleo, e os mecanismos das técnicas de MEOR. Também são discutidos os conceitos mais recentes em relação aos processos biológicos atuantes no petróleo (microbiologia do petróleo). Diversas

ferramentas da microbiologia são descritas, pois representam os meios para manipular, controlar, e monitorar os agentes (micro-organismos) e os processos envolvidos em MEOR.

No Capítulo 4 é apresentado um arcabouço de MEOR, como uma das vertentes de EOR. São discutidos alguns estudos sobre as técnicas de MEOR, e apresentados os resultados de alguns trabalhos desenvolvidos pelo autor e coautores, sobre algumas técnicas de MEOR. Também são descritas algumas das principais técnicas de MEOR, novas abordagens para o estudo e aplicação de técnicas de MEOR, e as implicações estratégicas de MEOR.

No Capítulo 5 é feita uma descrição da geologia regional do Brasil, com foco especial nos principais tipos de reservatórios de hidrocarbonetos no Brasil, e das especificidades que podem sugerir um possível benefício do uso das técnicas de MEOR. Trata-se de descrever aspectos que possam ser importantes para o êxito da aplicação de determinadas técnicas de MEOR.

No Capítulo 6 é descrito um estudo preliminar realizado com ensaios em laboratório, de uma das técnicas de MEOR que o autor propõe como uma nova técnica pouco estudada, com potencial de aplicabilidade em alguns reservatórios brasileiros: a bioacidificação.

No Capítulo 7, são discutidos os resultados da pesquisa realizada, e os aspectos que relacionam condições geológicas e outras, à favorabilidade da aplicação de certas técnicas de MEOR no Brasil, incluindo a técnica de MEOR denominada bioacidificação, que foi objeto de estudo preliminar no Capítulo 6. Também são discutidos os aspectos que relacionam o potencial de certas técnicas de MEOR com a recomendação de realizar mais estudos. Finalmente, são tecidas considerações a respeito das implicações estratégicas das técnicas de MEOR para os detentores dessa tecnologia, apontando os prováveis caminhos para maximizar seus benefícios.

A seção “Conclusões” apresenta resumidamente as conclusões em relação aos objetivos da tese. São relacionadas técnicas de MEOR mais adequadas à realidade brasileira, e aquelas que merecem mais estudos, focados no aprimoramento de sua aplicação, ou na viabilização comercial dessas técnicas. Também é enfatizado o potencial estratégico de MEOR para impulsionar o

desenvolvimento econômico e estratégico do país, sob dois possíveis modelos de negócios, que preconizam a participação de diferentes *players* da indústria como protagonistas dessa atuação.

Diversos apêndices contêm algumas listas que podem ser úteis para os pesquisadores do tema: empresas e instituições com atuação em MEOR (Apêndice A); micro-organismos, alguns de seus produtos e processos, e utilização em MEOR (Apêndice B). Outros anexos contêm os textos completos de alguns trabalhos desenvolvidos pelo autor e coautores, sobre MEOR (Apêndices C a G). Finalmente, as fotografias das lâminas petrográficas, objeto do estudo preliminar realizado no Capítulo 6, estão no Apêndice H.

1 ESTÁGIO ATUAL DA E&P DE PETRÓLEO E GÁS

1.1 Produção dos Recursos Petrolíferos

O objetivo da produção de óleo e gás de um reservatório é a retirada da maior parte possível do volume de óleo e gás (óleo equivalente) que estava ali contido inicialmente. Esta quantidade de hidrocarbonetos, na terminologia prevalente na indústria do petróleo, se denomina óleo originalmente *in situ*, ou OOIP (*original oil in place*), também chamado de OIIP (*oil initially in place*).

No reservatório, existe um ambiente multifásico, composto de pelo menos duas fases, e geralmente mais de duas, entre óleo, água, gás e possivelmente outros compostos naturais ou introduzidos. Também existem as interfaces entre essas fases, de suma importância para entender e poder dirigir os processos que ocorrem em nível microscópico, os quais, agregados através de todo o reservatório, resultam na produção factível desse reservatório. Dessa forma, é imprescindível compreender como se comportam as diferentes fases presentes no reservatório, a partir das interações hidrodinâmicas que ocorrem nos poros. Numa visão simplificada, a produção do reservatório pode ser entendida como a variação das saturações do óleo e da água do reservatório.

1.2 Modelagem Multifásica de um Reservatório

Como os fluxos nos reservatórios são relativamente lentos, as forças interfaciais controlam o comportamento das fases presentes, portanto uma abordagem em escala de poros é necessária para compreender essa dinâmica. As variações das saturações do óleo e da água do reservatório podem ser modeladas de forma simplificada, através da descrição do comportamento simultâneo das duas fases, como descrito no diagrama da Figura 1. Para levar em consideração sistemas mais complexos, como por exemplo, no caso da aplicação de técnicas de produção

que envolvem fases adicionais, pressões modificadas artificialmente, etc., essa modelagem simplificada pode ser ajustada para incorporar mais fases.

Figura 1 – Descrição das curvas de saturação de água e óleo durante a drenagem e imbibição



Legenda: em azul: redução da água original e acúmulo de óleo no reservatório; em verde: entrada de água no reservatório e produção de óleo.

Fonte: O autor.

Armstrong (2012) propõe uma modelagem do comportamento dos sistemas multifásicos operantes em reservatórios, em que o fluxo multifásico é descrito pelas equações de Darcy e pelo comportamento das permeabilidades relativas de cada fase (água e óleo). Incorporando equações descrevendo o balanço de massa do sistema (conservação de massa) e as saturações de cada fase (devem somar 100% dos fluidos contidos), a dinâmica do sistema pode ser descrita em termos da variação no tempo das pressões e das saturações da água e do óleo, variáveis que podem ser solucionadas com essas equações.

1.3 Escoamento do Óleo

Os hidrocarbonetos escoam de um reservatório, onde se encontram na natureza, até o poço de produção, através de um regime de escoamento geralmente

ditado pelas características do reservatório, como permeabilidade, pressão, temperatura e características do óleo; e pelas características do poço de produção, como diâmetro, comprimento, disposição ao longo do reservatório, intervalo canhoneado, qualidade da completação do poço, etc. Do poço até a superfície, onde geralmente o óleo e gás são coletados, separados e processados, o regime de escoamento geralmente é ajustável, por meio de equipamentos como bombas ou características físicas do layout do intervalo produtor ou das instalações de superfície. Dessa forma, é possível controlar a combinação do nível produção e da recuperação total (fator de recuperação) correspondente. Esses parâmetros geralmente não podem ser simultaneamente maximizados, pois com uma produção demasiadamente elevada a recuperação total pode sofrer redução. É necessário buscar um equilíbrio entre as duas variáveis, dentro do que é tecnicamente possível, para otimizar o retorno econômico ao longo da vida útil do ativo, ou seja, do campo ou reservatório de onde se realiza a extração (MEZZOMO, 2006a).

Como um reservatório de petróleo é basicamente composto por rocha com certa porosidade, e fluidos contidos nessa porosidade, a produção de petróleo e gás pressupõe a liberação desses fluidos, superando a resistência à sua expulsão dos poros. Essa resistência é principalmente devida à pressão confinante da coluna hidrostática atuante no reservatório, à geralmente baixa permeabilidade das rochas dos reservatórios, e às características do óleo contido e da rocha, como alta viscosidade ou baixa permeabilidade, respectivamente. Para vencer essa resistência à expulsão do reservatório, na produção de óleo e gás são usadas, inicialmente, como fontes de energia (SOUZA e SANTANA, 2010):

- A decompressão dos fluidos do reservatório, ao permitir o escoamento dos fluidos para fora do reservatório, através do poço produtor;
- A contração do volume poroso da rocha do reservatório, devido ao escoamento dos fluidos para fora do reservatório, e também devido ao efeito da pressão atuante sobre o reservatório, por conta da coluna de rocha sobrejacente; e
- O deslocamento de um fluido por outro fluido.

Diversas técnicas de produção utilizam diferentes meios para aproveitar passivamente ou criar artificialmente as fontes de energia acima, usadas para expulsar o óleo dos reservatórios. Na concepção tradicional da indústria de petróleo, essas técnicas são geralmente consideradas técnicas de produção com recuperação primária (aproveitamento passivo dos efeitos acima), ou técnicas de produção com recuperação secundária (criação artificial dos efeitos acima).

Posteriormente, surgiram outras técnicas de produção que buscam efeitos que complementam ou substituem essas energias, para facilitar a produção de óleo e gás de reservatórios onde elas não atuam satisfatoriamente. De especial importância, as técnicas que buscam reduzir a viscosidade do óleo a ser produzido são muito eficazes, pois afetam diretamente a vazão de produção, por conta da relação dada pela lei de Darcy:

$$\frac{q}{A} = v = \frac{k \Delta P}{\mu L} \quad (1)$$

onde v é a velocidade do fluxo de produção; q é a vazão (volume por tempo); μ é a viscosidade do óleo produzido; A é a área da seção por onde escorre a vazão (tipicamente, o tubo de produção do poço); k a permeabilidade da rocha; e ΔP o gradiente de pressão através da distância L . Fica claro que ao reduzir a viscosidade μ , a velocidade v do fluxo de produção, assim como a vazão q , aumentam em proporção direta.

Na concepção tradicional da indústria de petróleo, essas técnicas são chamadas de técnicas de produção com recuperação terciária.

1.4 Visão Tradicional dos Métodos de Produção

Como tradicionalmente preconizado pela indústria do petróleo no mundo todo, a exploração dos recursos petrolíferos segue uma ordem de prioridade em relação aos mecanismos de extração. Essa ordem de prioridade visa minimizar o custo de extração a cada instante, deixando para mais adiante a utilização de técnicas que

impliquem em mais gastos por barril extraído, como forma de reduzir as despesas correntes que impactam negativamente o fluxo de caixa do reservatório ou campo. Na disciplina de “Economia do Petróleo”, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, esse conceito tem sido amplamente difundido como parte dos fundamentos da operação da indústria do petróleo no mundo (CHAVES, 2012).

1.4.1 Recuperação Primária

Nas técnicas de produção com recuperação primária, mais de um mecanismo pode atuar simultaneamente; um deles pode ser preferencial (dominante), ou eles podem ser equivalentes, resultando numa situação de um mecanismo combinado (SOUZA e SANTANA, 2010). As técnicas de recuperação primária também são chamadas de técnicas de produção natural (*natural drive*), pois a força que impulsiona a produção nesses mecanismos é oriunda de condições naturais existentes nos reservatórios.

Os mecanismos de produção primária de petróleo, de jazidas convencionais são (MEZZOMO, 2006a):

- Influxo de água
- Liberação de gás dissolvido
- Expansão da capa de gás
- Mecanismos combinados
- Segregação gravitacional

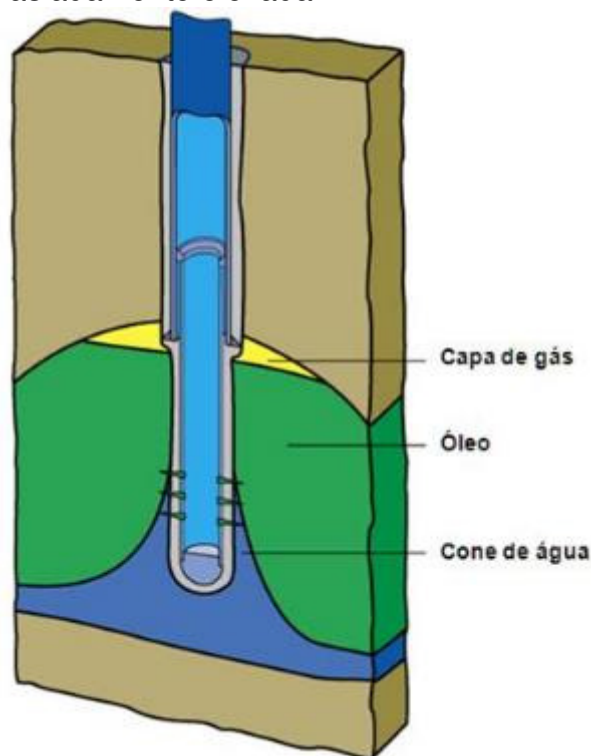
O mecanismo de influxo de água funciona pela pressão fornecida ao óleo, por um aquífero conectado hidráulicamente à zona de óleo. Em alguns casos, apenas com esse regime de produção o fator de recuperação pode atingir 70% ou mais, dependendo das características do reservatório.

O mecanismo de liberação de gás dissolvido pode ocorrer quando o reservatório é confinado geologicamente e a pressão do gás dissolvido nos reservatórios expulsa o óleo. O problema com este tipo de mecanismo é que assim que a pressão cai abaixo da pressão de saturação do gás no óleo, o gás dissolvido é produzido em abundância, e o reservatório passa a produzir com alta razão gás-óleo (RGO). Dessa forma, cai a quantidade de gás remanescente no óleo para dar continuidade ao processo, e o fator de recuperação que pode ser atingido com este mecanismo costuma ser baixo, até inferior a 20%.

O mecanismo de expansão da capa de gás (gás livre, associado) envolve sua expansão, à medida que fluidos são retirados do reservatório, fazendo com que ela cresça e penetre na zona de óleo. A pressão do reservatório declina lentamente, pois o gás se expande. Este mecanismo permite que a RGO seja controlada mais facilmente, apenas evitando produzir o gás e privilegiando, primeiro, a produção do óleo.

O mecanismo de segregação gravitacional contribui para uma maior eficiência dos mecanismos de produção por influxo de água e por expansão da capa de gás, impedindo que a água abaixo do óleo se adiante ao óleo, ou que o mesmo aconteça com o gás da capa de gás acima do óleo. Quando o mecanismo de produção é por influxo de água, e elevadas vazões de produção são utilizadas, é possível que se formem cones de água, que prejudicam a recuperação do óleo ao alcançar a região canhoneada dos poços de produção, por onde somente deveria entrar óleo. (Figura 2).

Figura 2 – Formação de cones de água ou gás, quando a produção se dá em uma vazão demasiadamente elevada



Fonte: SCHLUMBERGER, 2013a.

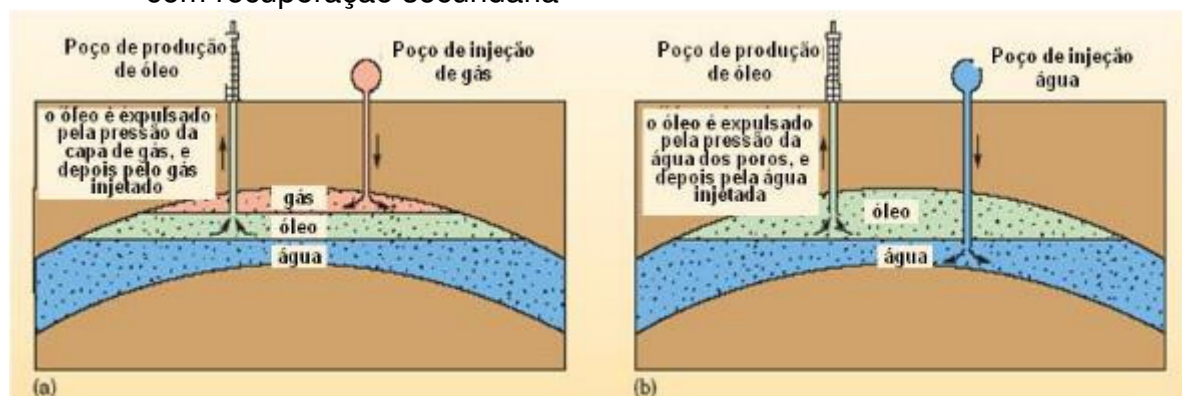
O mesmo pode acontecer quando o mecanismo de produção é por expansão da capa de gás, e elevadas vazões de produção são utilizadas. É possível que se formem cones de gás semelhantes aos cones de água, só que invertidos, já que sua densidade é menor que a do óleo. Ao chegar ao segmento do poço em que ocorre a produção de óleo, o gás é produzido, em vez do óleo, já que tem características de fluxo que favorecem seu escoamento em relação ao do óleo (menor viscosidade).

1.4.2 Recuperação Secundária

A recuperação secundária ocorre quando a produção de óleo se dá pela suplementação da energia natural do reservatório. As técnicas de recuperação secundária geralmente estão associadas a termos como técnicas de produção artificial (*artificial lift*), ou de estimulação da produção, pois a força que impulsiona a produção nesses mecanismos é oriunda de intervenções realizadas pelo homem.

Os principais métodos utilizados na recuperação secundária são a injeção de água ou gás (ALMEIDA, 2004). Para maximizar a expulsão do óleo de um reservatório onde se está utilizando um método de recuperação secundária, a água deve ser injetada abaixo do horizonte natural do contato água-óleo; no caso da injeção de gás, este deve ser injetado acima do horizonte natural do contato gás-óleo. Dessa forma será possível evitar a produção indesejada do fluido injetado, em detrimento do efeito buscado, de aumentar a pressão do reservatório e manter a produção de óleo o mais elevada possível. Esses conceitos podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3 – Injeção de água ou gás em um reservatório sob um regime de produção com recuperação secundária



Fonte: Adaptado de THE OPEN UNIVERSITY, 2012.

1.4.3 Recuperação Terciária (Recuperação Avançada)

Na recuperação terciária, a produção de óleo ou gás é obtida através de métodos que fornecem outras fontes de energia, ou conseguem efeitos físicos, químicos ou biológicos que estimulam a produção de óleo e gás. Os principais métodos utilizados na recuperação terciária são (ALMEIDA, 2004):

- Térmicos (injeção de vapor, combustão in situ, aquecimento artificial com energia elétrica, eletromagnética ou outras)

- Miscíveis (injeção de CO₂, gás liquefeito de petróleo, nitrogênio, e outros gases ou solventes)
- Biológicos (injeção de nutrientes ou micro-organismos)
- Químicos (polímeros, tensoativos, álcalis, ácidos, e outros)
- Físicos (vibração, radiação, etc.)

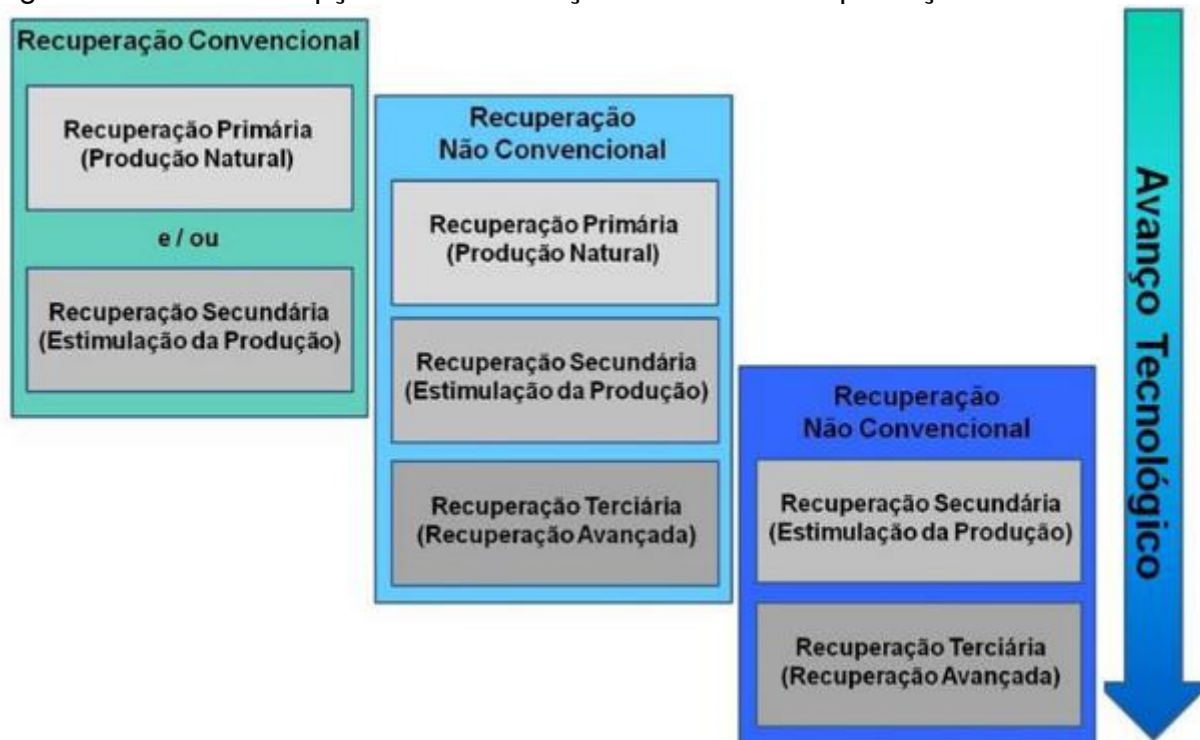
Mais detalhes sobre alguns destes métodos são descritos no Capítulo 2 (Recuperação Avançada de Óleo – EOR).

1.5 Novos Paradigmas

Na visão tradicional da indústria de petróleo e gás, se acreditava que a forma de maximizar o valor presente líquido (VPL) do ativo seria optar pela utilização de métodos de produção classificados como recuperação primária, secundária e terciária, nessa ordem, e apenas de acordo com as necessidades mecânicas do campo, a cada instante. Porém, atualmente já está em curso uma mudança nesse paradigma, pois através de simulações do comportamento de reservatórios e do fluxo de caixa correspondente às diversas escolhas entre os diferentes regimes de produção e técnicas utilizadas para produzir hidrocarbonetos de um campo, é possível identificar a melhor forma de produzir esses recursos, e nem sempre a escolha tradicional (utilização apenas sequencial de métodos de produção classificados como recuperação primária, secundária e terciária) é a mais eficiente.

Uma forma de visualizar esse novo arranjo das formas de produção, distribuídas entre os mecanismos de produção primária, secundária e terciária, e as classificações de recuperação convencional e não convencional pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Nova concepção da classificação das formas de produção



Legenda: Duas classificações: Recuperação Convencional (uso de mecanismos de produção primária e/ou secundária); e Recuperação Não Convencional (uso de mecanismos de produção primária, secundária e terciária, ou só de secundária e terciária).

Fonte: O autor.

1.5.1 Recuperação Convencional

Hoje, já há o entendimento de que a utilização de métodos de recuperação primária e secundária concomitantemente (e.g.: utilização da pressão natural mais injeção de água e gás) representa o que se passou a chamar de uma recuperação convencional. Essa visão representa um novo entendimento do que seja uma recuperação convencional, que passa a contemplar, também, o uso de métodos de recuperação secundária.

1.5.2 Recuperação Não Convencional

No caso da utilização de métodos de recuperação primária, secundária e terciária (ou apenas secundária e terciária) concomitantemente, a designação é de uma recuperação não convencional, que, além da pressão natural, se estiver presente, pode incluir a injeção de água e/ou gás, e/ou métodos químicos, miscíveis, etc. (ALMEIDA, 2004).

Em muitos campos de petróleo cuja produção foi iniciada recentemente, essa produção foi planejada levando em conta a utilização de métodos de recuperação secundários desde o início da produção. É o caso, por exemplo, do plano de desenvolvimento que havia sido preparado para o novo campo da OGX em águas rasas da Bacia de Campos, Tubarão Azul, antes que este fosse declarado não comercial (OGX, 2012). Vários campos da Petrobras em águas profundas da Bacia de Campos, Santos e do Espírito Santo também terão planos de desenvolvimento semelhantes. Por exemplo, os campos de Baleia Azul, Jubarte e Pirambu, localizados no Parque das Baleias, antiga região produtora de formações do pós-sal, receberão a FPSO Cidade de Anchieta para iniciar sua produção exclusivamente das formações mais profundas do pré-sal. Eles receberão instalações que incluem poços injetores de água, que operarão desde o início da produção (PORTAL MARÍTIMO, 2012).

Em todos esses campos, as instalações de produção contemplam, além dos poços de produção, a operação simultânea de poços injetores de água (método secundário de recuperação), conectados às suas respectivas plataformas de produção. Apesar de que alguns desses campos somente poderiam produzir através de métodos de recuperação secundária, pois seu óleo é extra-pesado e necessita de muita pressão adicional para ser produzido, em outros casos os campos que estão sendo colocados em produção poderiam produzir pelo menos uma boa quantidade de óleo utilizando apenas métodos de recuperação primária. Mas foi feita uma escolha técnica para realizar sua exploração, desde o início, empregando métodos de recuperação secundária também. Essa nova realidade, em muitos campos do mundo, representa uma quebra do paradigma reinante no passado, em que a

produção somente se dava por recuperação primária, secundária e terciária sequencialmente, não concomitantemente.

Também já existem diversos exemplos de campos cuja exploração foi planejada para ser executada como uma recuperação não convencional, utilizando métodos de recuperação primária e secundária, mas que também empregam uma complexa combinação de injeção de gases (recuperação terciária), além de água e de metano. É o caso, por exemplo, do pré-sal. A exploração do campo de Lula, através do sistema provisório de produção que está sendo instalado (FPSO Cidade de Angra dos Reis), contempla métodos de recuperação primária, secundária e terciária simultaneamente. A recuperação primária ocorre, pois existe óleo leve cuja pressão possivelmente seria suficiente para permitir sua produção. A recuperação secundária é realizada através de poços de injeção que injetarão água e reinjetarão o gás produzido, pelo menos parcialmente, pois parte será escoada por gasoduto para o sistema de produção do campo gás de Mexilhão. A recuperação terciária também é realizada através de poços de injeção, que neste caso reinjetarão o CO₂ associado à produção (PETROBRAS, 2011; TECNOIL, 2012).

Em diversos campos do pré-sal, a reinjeção de gás e CO₂ será utilizada por conta dos efeitos benéficos sobre a produção (aumento da pressão no reservatório e efeito de miscibilidade no óleo do reservatório). O método miscível de recuperação terciária através da injeção de CO₂ é um dos métodos mais eficazes e atrativos para a indústria de petróleo, devido ao seu comportamento em contato com hidrocarbonetos, mesmo os mais pesados, e à sua relativa facilidade de manuseio (MEZZOMO, 2006b).

Mas essas medidas também encontram apoio por conta de considerações ambientais e logísticas. Para o gás associado produzido, há três alternativas: escoar a produção; queimar esse gás através de *flaring*; ou reinjetar o gás no campo produtor. Não é sequer considerada a opção de *venting*, ou seja, de liberar o gás na atmosfera sem queima, pois isso representa um sério risco e uma grande fonte de emissão de gases de efeito estufa, já que o metano tem um poder de efeito estufa mais de 20 vezes superior ao do CO₂, o produto de sua combustão, tornando sua queima uma opção mais conveniente do ponto de vista ambiental. Porém mesmo com o *flaring* desse gás, o CO₂ resultante também representaria uma significativa emissão de gases do efeito estufa, pois alguns campos produzem muito gás

(portanto muito CO₂ seria liberado por sua queima). Dessa forma, a reinjeção do gás associado produzido é uma forma de se reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Da mesma forma, para o CO₂ associado produzido, há duas alternativas: reinjetar esse gás no campo produtor ou liberá-lo na atmosfera. Como forma de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a opção preferível é sua reinjeção. Mas essa reinjeção também representa um método miscível, com importantes vantagens na melhora da produção e recuperação do óleo dos reservatórios.

Em relação às limitações logísticas, a falta de sistemas de escoamento adequados para direcionar a produção de gás para os mercados consumidores cria um problema para o gás associado produzido. Sem poder monetizar esse gás através de sua produção, a reinjeção também surge como opção mais atrativa, já que dessa forma esses recursos não são desperdiçados através de *flaring* (destruídos com a queima), e permanecem disponíveis no reservatório para uma possível produção futura, além de ajudar na manutenção da pressão dos reservatórios, enquanto produzem óleo. Como a quantidade de gás contida no óleo de alguns desses reservatórios é muito grande, essa não é uma consideração trivial.

Também há relatos na literatura, sobre casos em que um campo é desenvolvido desde o início de sua produção, através de métodos de recuperação terciária envolvendo MEOR. Um dos poucos exemplos, pois pode haver outros que por considerações competitivas e estratégicas foram mantidos em sigilo, é o do campo de Norne, no Mar do Norte da Noruega (OFFSHORE MAGAZINE, 2001). Esse exemplo representa outra quebra de paradigma, dessa vez por utilizar MEOR como método de recuperação terciária desde o início do processo de desenvolvimento do campo.

1.6 A Teoria do Processo Exploratório dos Recursos Petrolíferos

Não há mais petróleo fácil a ser explorado. A frase, hoje tida cada vez mais como verdadeira pelos observadores da indústria do petróleo e gás, reflete a

experiência empírica dos últimos anos, das empresas que têm se dedicado à busca de novos recursos energéticos convencionais, para atender à crescente demanda por petróleo e gás no mundo. Novas acumulações significativas de recursos convencionais de petróleo e gás estão cada vez mais difíceis de serem encontradas, pois, como seria de se esperar, as maiores acumulações existentes no mundo teriam sido encontradas primeiro, restando, através dos anos, acumulações cada vez menores, ainda por serem encontradas.

Este conceito, que governa a busca por recursos de qualquer tipo, em qualquer escala espacial em que se esteja atuando na exploração desses recursos, foi descrito em 1958, por Arps e Roberts. Eles fizeram uma análise estatística da correlação entre os volumes recuperáveis de petróleo e o número de poços perfurados, em uma determinada área de calibração dentro da Bacia de Denver-Julesberg, nos EUA. A partir dessa correlação foi plotada a frequência da distribuição dos campos descobertos, contra os valores recuperáveis, para cada classe de tamanho de campo. Da relação entre o número de campos descobertos de uma determinada classe de tamanho, e o número de poços exploratórios perfurados (uma medida do esforço exploratório realizado) numa determinada área de calibração, resultou sua famosa expressão, a fórmula de Arps e Roberts:

$$F = F_0 [1 - e^{-cwa/B}] \quad (2)$$

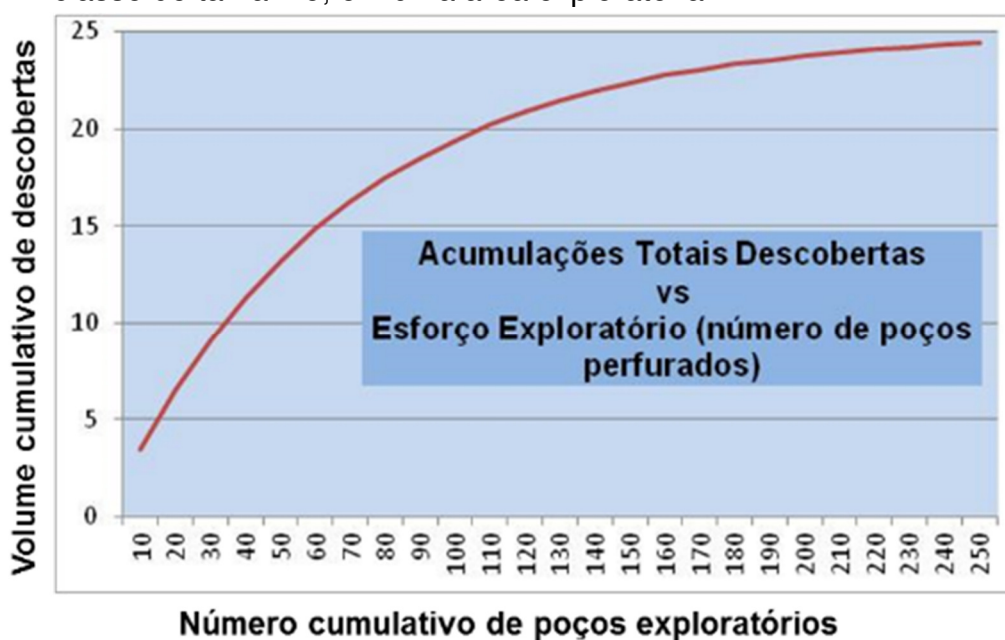
onde o número F de todos os campos de determinada classe de tamanho já descobertos é uma função do número original F_0 de todos os campos existentes dessa classe de tamanho; da área média a desses campos; da área total B da região de calibração; do número de poços exploratórios w perfurados na região de calibração; e de um fator de eficiência exploratória c , que descreve a taxa relativa de sucesso exploratório (ARPS e ROBERTS, 1958).

A experiência exploratória (variável c na fórmula de Arps e Roberts) está relacionada à razão entre a probabilidade de que um determinado poço faça uma descoberta, e a probabilidade de que um poço aleatoriamente localizado na bacia faça uma descoberta. Como os poços geralmente não são perfurados aleatoriamente, mas seguem indícios de favorabilidade geológica, apontados por diversos métodos de exploração, como sísmica, métodos não sísmicos, etc., há mais probabilidade de que poços perfurados façam descobertas do que seria o caso com poços aleatórios. Dessa forma, é de se esperar que para os recursos convencionais

localizados em uma determinada bacia, ou mais amplamente, em um continente ou no mundo, as maiores descobertas já teriam sido feitas, e agora estamos na fase de esforços exploratórios que somente adicionam menores acumulações ao total de descobertas, fase que se denomina de exploratoriamente madura.

Apesar de que a fórmula de Arps e Roberts sugere que o número total de descobertas aumenta com mais esforços exploratórios realizados, a qualquer instante (comportamento marginal), para cada novo esforço exploratório adicional, o número de campos de um determinado tamanho que se espera sejam descobertos é uma função declinante. Um exemplo hipotético (Figura 5) pode ilustrar essa relação conceitual. Numa bacia de tamanho $B = 1.000$ unidades de área, para campos com tamanho $a = 10$ unidades de área (relacionado ao seu volume), o valor de F , ou seja, o número desses campos descobertos cresce cada vez menos, ao longo do tempo (número de poços w perfurados), dada uma experiência exploratória $c > 1$ ($c = 1,5$, no caso mostrado). Na prática, usa-se uma média de tamanhos para cada classe de tamanhos de campos, para realizar uma análise por classes, geralmente em escala logarítmica.

Figura 5 - Comportamento teórico das descobertas de campos de uma determinada classe de tamanho, em uma área exploratória



Legenda: Exemplo das acumulações totais descobertas em uma área exploratória de tamanho $B = 1000$ unidades de área, para campos de tamanho $a = 10$ unidades de área, dentro de uma bacia hipotética com experiência exploratória $c = 1,5$, mostrando o retorno decrescente, com novos esforços exploratórios.

Fonte: O autor.

A curva da Figura 5 descreve a sequência de descobertas nessa bacia (*Discovery Sequence*). Em 1980, Drew, Schuenemeyer e Root desenvolveram um modelo (“Modelo DSR”) para relacionar a série histórica de descobertas (incluindo seu tamanho) ao número de poços perfurados, como forma de projetar o ritmo provável de futuras descobertas em uma determinada bacia. Os dois parâmetros exógenos desse modelo são a eficiência dos esforços exploratórios, ou seja, a capacidade de identificar os melhores alvos dentre aqueles disponíveis, a cada instante, e o tamanho efetivo da bacia, ou seja, o universo em que se opera (DREW, SCHUENEMEYER, ROOT, 1980).

Em relação à estimativa de recursos a descobrir (*yet-to-find oil*), o próximo passo foi relacionar o histórico descrito pela sequência de descobertas e os parâmetros geológicos da área de estudo. Esses parâmetros geológicos definem as características da área de estudo, e podem ser representados pela quantidade total de campos existentes e pela distribuição do tamanho desses campos existentes.

Dessa forma, os dois principais conceitos que enquadram toda a ciência envolvida na análise e previsão de acumulações de hidrocarbonetos em bacias petrolíferas são o da distribuição dos tamanhos das acumulações (FSD – *Field Size Distribution*), e o da ordem de descoberta dessas acumulações (*Discovery Sequence*). Em relação à FSD dos campos em uma determinada área exploratória, ela segue, em geral, uma distribuição log-normal. Em relação à sequência de descobertas, quanto maiores os campos, mais provável é que sejam descobertos mais facilmente (esta é a experiência exploratória), portanto são geralmente descobertos primeiro (DREW, ATTANASI, SCHUENEMEYER, 1988). Dessa forma, a avaliação do potencial de possíveis descobertas futuras de um *play* individual (ou até de recursos convencionais no mundo) consiste em estimar parâmetros geológicos que definem uma área a ser estudada, observar seu histórico de descobertas, e aplicar uma metodologia (ferramentas estatísticas) que relacione esses conceitos. Isso equivale a estimar a distribuição dos tamanhos de acumulações (FSD) e o número possível de acumulações, e quantificar o risco de exploração através da análise da série histórica observada, fazendo simulações dos possíveis resultados estatísticos através de análise estocástica, geralmente com simulações Monte Carlo. Os resultados desse processo são curvas probabilísticas

que descrevem os tamanhos de acumulações que ainda estão por ser descobertas, e o volume total dessas acumulações (JONES, 2009a).

Cabe lembrar que a fórmula de Arps e Roberts e o modelo DSR consideram plays relativamente mais homogêneos. Por esse motivo, podemos estudar e descrever o ritmo das descobertas passadas e das possíveis descobertas futuras, ou seja, o fenômeno do processo exploratório de uma determinada área, no que concerne a ocorrência de recursos convencionais, mas não podemos fazer uma análise semelhante sobre as perspectivas de descobertas que englobem recursos convencionais e não convencionais, pois eles têm características geológicas muito diferentes entre si. Certamente estamos vendo um retorno declinante de novas descobertas de recursos convencionais (resultados empíricos), em relação aos esforços exploratórios realizados. Porém não podemos dizer que o mesmo também se aplica aos recursos não convencionais, pois podemos estar em diferente estágio exploratório para esses recursos (provavelmente um estágio onde ainda temos perspectivas de obter grandes retornos em relação aos respectivos esforços exploratórios).

1.7 Descobertas Passadas e Futuras de Recursos Petrolíferos

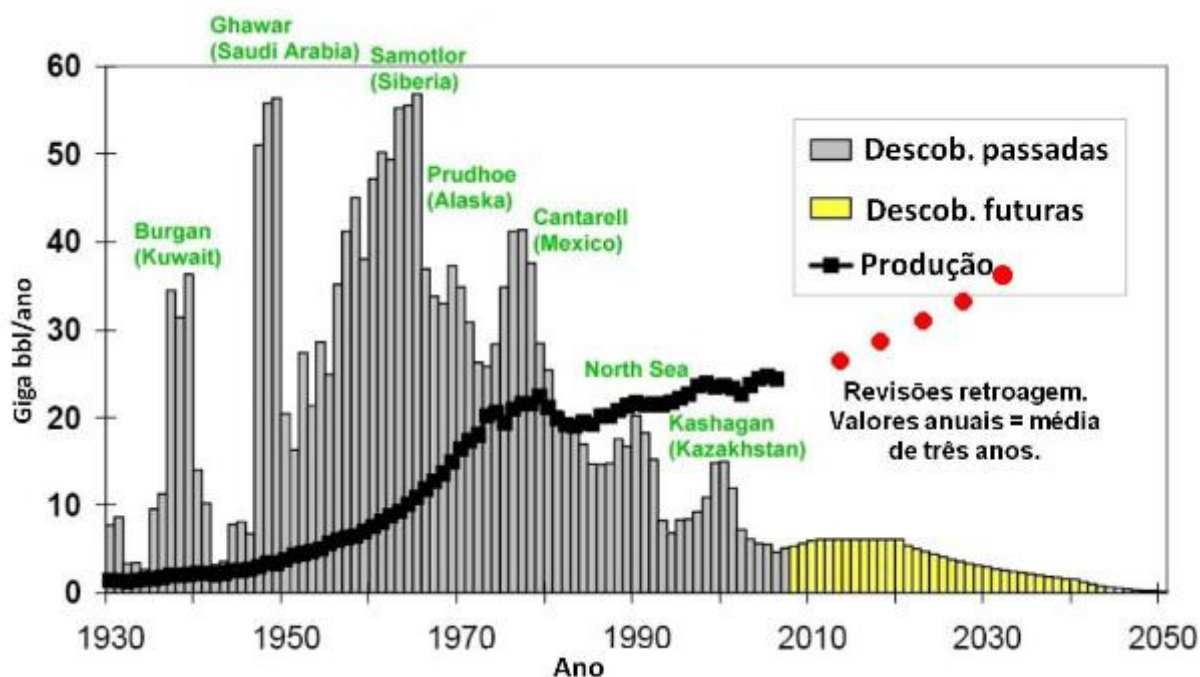
Jean Laherrère foi autor do artigo “The End of Cheap Oil” (CAMPBELL e LAHERRÈRE, 1998), que trouxe grande visibilidade para o tema do pico do óleo (*Peak Oil*), ou seja, da possibilidade de que estejamos prestes ou até além do pico da produção mundial de óleo convencional. Na concepção de *Peak Oil*, esse ponto também corresponderia à produção da metade dos recursos totais disponíveis para serem explorados. Recentemente Laherrère sugeriu que as descobertas cumulativas de petróleo, provadas mais prováveis, em nível mundial, excluindo óleo extra-pesado, sofreram três ciclos de exploração que levaram às descobertas realizadas até o presente momento. O primeiro ciclo foi a exploração de superfície, de 1900 a 1950; o segundo foi a exploração com ferramentas sísmicas, a partir de 1930 até o presente; o terceiro foi a exploração em águas profundas (mais de 500m de lâmina d'água). De acordo com sua análise das descobertas acumuladas até o presente,

ele calcula que a sequência de descobertas descreve um processo exploratório que define um limite de volume acumulado de descobertas possíveis igual a 2,2Gb de petróleo. Como a produção mundial até a presente data totalizou aproximadamente 1,1Gb, por essa análise estaríamos bem próximos do chamado pico da produção, onde 50% do óleo convencional existente e recuperável com as técnicas atualmente disponíveis já teria sido produzido (LAHERRÈRE, 2011).

Quanto à situação de descobertas mundiais de recursos de petróleo convencional, essa análise nada mais é do que a somatória das descobertas de todos os países onde ocorreram descobertas de petróleo. O processo exploratório desse conjunto, ou seja, a evolução das descobertas mundiais de recursos petrolíferos convencionais, tem sido estudado por várias organizações que se dedicam a acompanhar essa evolução. Algumas dessas organizações mais conhecidas são: Association for the Study of Peak Oil & Gas USA - ASPO (<http://aspousa.org>); Hubbert Center (<http://www.hubbertpeak.com>); The Oil Drum (<http://www.theoil Drum.com>); Planet for Life (<http://www.planetforlife.com>); assim como inúmeros pesquisadores individuais e equipes, que mantêm blogs sobre o assunto. No entanto, devido às conclusões mais comuns desses estudos, que geralmente apontam consequências possivelmente catastróficas para a economia mundial, eles têm sido marginalizados, e apenas representam uma visão fora do *mainstream* da comunidade da indústria energética internacional.

Essas previsões são fruto natural dos dados sobre as descobertas e a produção, em nível mundial, que geralmente mostram um pico histórico dessas descobertas, já ocorrido ou prestes a ocorrer, aliado a uma evolução praticamente constantemente crescente do consumo (como, por exemplo, na Figura 6 e Figura 7).

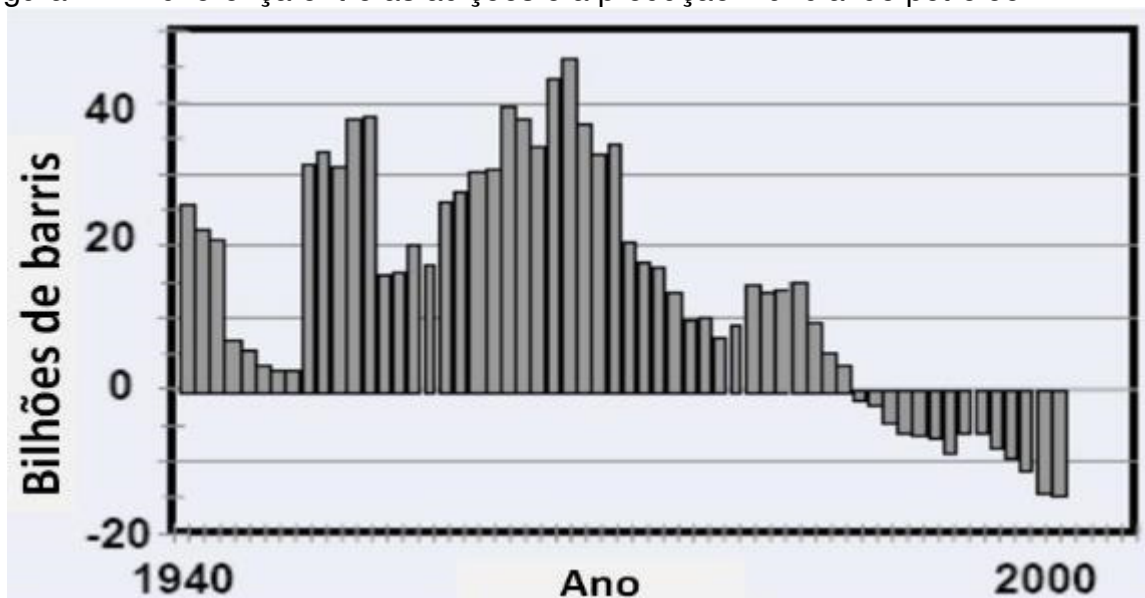
Figura 6 – As descobertas e a produção de petróleo convencional, em nível mundial



Nota: As descobertas sugerem uma eventual incapacidade de manter o ritmo da produção apenas com base nessa fonte energética.

Fonte: Adaptado de PLANET FOR LIFE, 2008.

Figura 7 – A diferença entre as adições e a produção mundial de petróleo



Nota: A diferença entre as adições e a produção mundial de petróleo mostra que o mundo vive um déficit nesse balanço, desde aproximadamente a década de 1980.

Fonte: Adaptado de HIRSCH, 2005.

Nesse contexto, é claro que eventualmente as descobertas acumuladas menos a produção passada não permitirão manter, indefinidamente, um ritmo

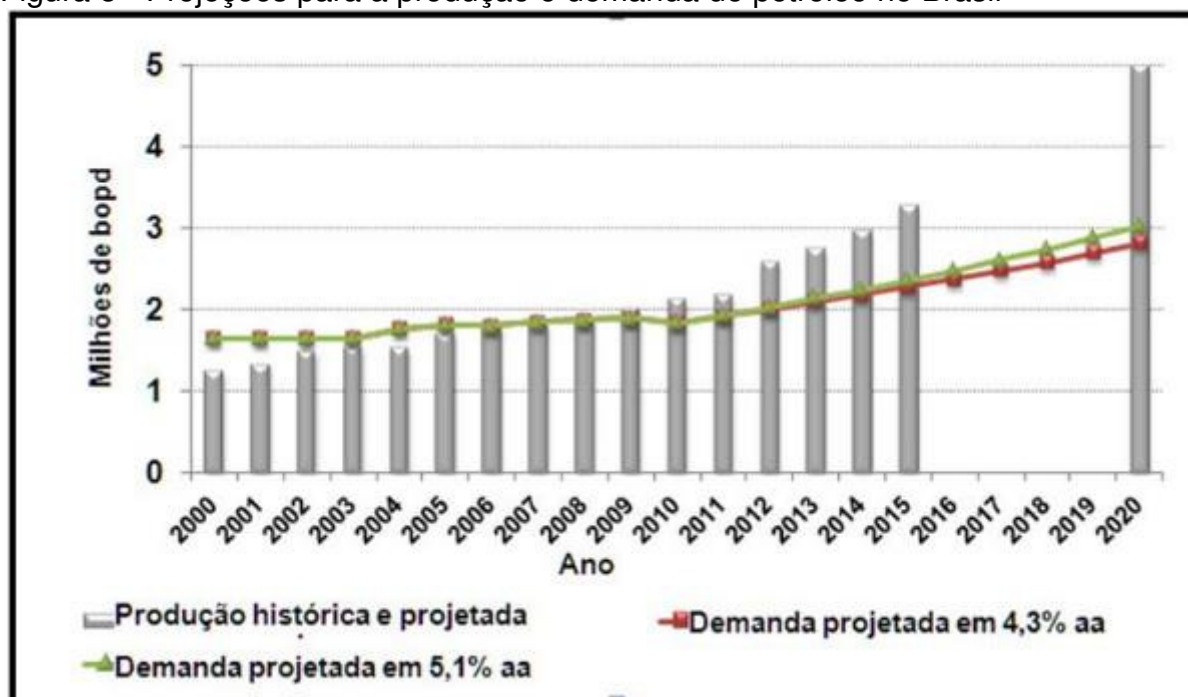
crecente de produção, e nesse caso haveria um choque na economia mundial, caso outras fontes energéticas não surgissem para cobrir o déficit da produção e suprir a demanda, evitando uma crise energética.

1.8 A Situação Exploratória no Brasil

No Brasil, as previsões em relação à demanda e produção futura de petróleo e gás apontam para significativos aumentos em relação aos níveis atuais (Figura 8). A ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) vem acompanhando os planos de desenvolvimento das operadoras que atuam no Brasil, e com base nessas informações estima que até 2020 a produção brasileira chegue a cinco milhões de barris de petróleo por dia, ou seja, praticamente duplicando a produção atual de aproximadamente dois e meio milhões de barris por dia de óleo equivalente (óleo e gás), em setembro de 2013 (ANP, 2013a)⁵.

⁵ Em setembro de 2013, segundo a ANP, foram produzidos no Brasil 2,094MMbbl/d (milhões de barris por dia) de óleo e 78MMm³/d (milhões de m³ por dia) de gás natural, totalizando 2,585MMboed (milhões de barris de óleo equivalente por dia).

Figura 8 - Projeções para a produção e demanda de petróleo no Brasil



Fonte: ANP, 2012a.

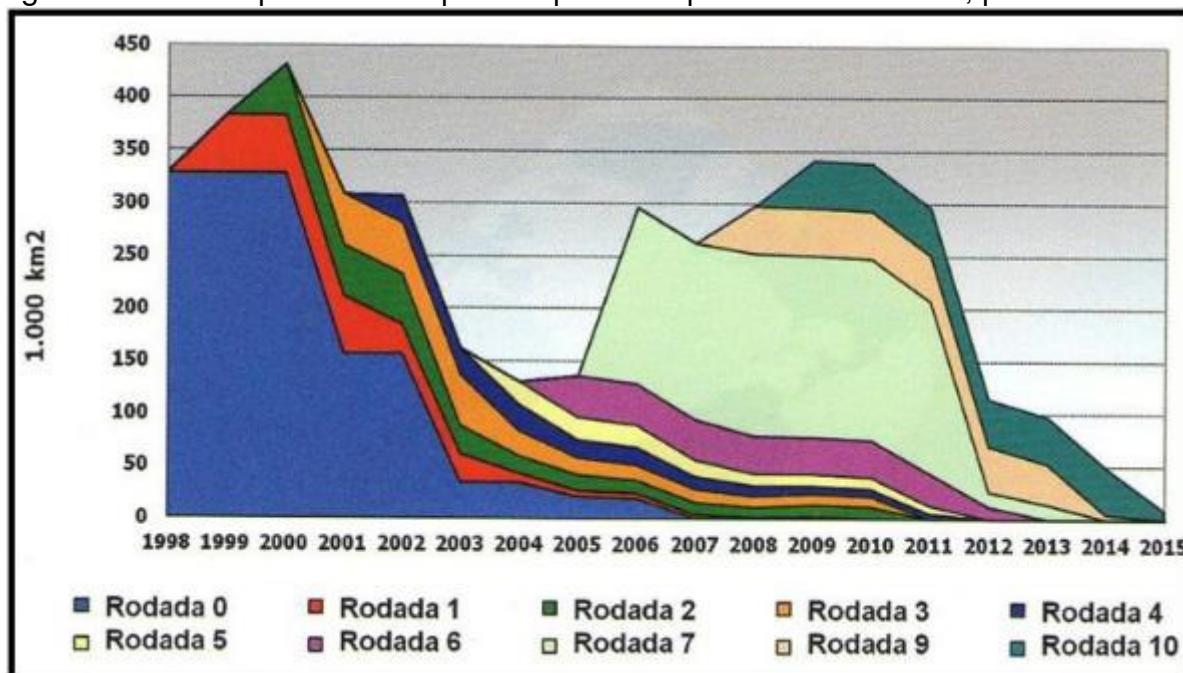
Apesar das previsões que sugerem uma situação muito positiva para a indústria de petróleo e gás no Brasil, nos próximos anos, há um crescente problema em relação à disponibilidade de áreas (blocos exploratórios) para que as operadoras no país possam desenvolver atividades exploratórias. A sequência regular de leilões de blocos exploratórios que o Brasil experimentou desde 1998 foi interrompida após as descobertas dos campos do pré-sal, e atualmente o Brasil enfrenta um apagão exploratório que tem prejudicado as grandes empresas de petróleo que operam no Brasil, impedindo o pleno aproveitamento dos seus recursos planejados, mobilizados e preparados para investir em atividades exploratórias. Dada a estabilidade do marco regulatório no Brasil desde 1998, elas contavam com essa continuidade, mas muitas dessas empresas se viram obrigadas a desenvolver atividades fora do país, para tentar manter a utilização de seu aparelhamento exploratório. Porém para as pequenas e médias empresas de petróleo no Brasil, que não contam com uma estrutura globalizada capaz de transferir suas atividades internacionalmente, essa ausência de novos blocos exploratórios pode implicar até mesmo em sua inviabilidade operacional. Segundo o secretário-executivo do IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis), Álvaro Teixeira, “Empresas grandes têm

oportunidades em outros lugares. Mas as pequenas empresas brasileiras só podem explorar no país. Se não houver oportunidade, elas morrem" (VEJA, 2012).

As implicações da relativa falta de novas áreas exploratórias no Brasil já haviam sido consideradas por Milton Franke em 2004, à época o Superintendente de Definição de Blocos da ANP (FRANKE, 2004). Para que a indústria de petróleo no Brasil pudesse seguir crescendo segundo um modelo expansionista, que busca o desenvolvimento de novas áreas exploratórias, em contraposição a um modelo que privilegia a exploração intensiva e maximizada de seus ativos (blocos em produção), seria necessária uma cultura que garantisse constante e regular oferta de novas áreas exploratórias (rodadas da ANP). Dada a já observada dificuldade de colocar à disposição das operadoras suficientes áreas exploratórias, também foi focada a necessidade de estimular o interesse por parte das mesmas em desenvolver ao máximo a recuperação adicional das áreas com descobertas antigas.

As novas rodadas realizadas em 2013, que colocaram mais áreas exploratórias à disposição, tanto em áreas regidas pelo modelo de concessão, como em áreas do pré-sal (ANP, 2012b; ESTADÃO, 2012), apenas aliviam a necessidade de colocar à disposição da indústria novas áreas exploratórias. Ainda assim, a drástica redução que vinha acontecendo das áreas exploratórias disponíveis para que as empresas possam levar adiante programas exploratórios pode ser vista na Figura 9. Essa redução, mesmo que seja revertida com a retomada das rodadas a partir de 2013, implica em maior necessidade por parte das operadoras de áreas atualmente em produção, de continuar buscando aproveitar ao máximo qualquer produção adicional possível, ou qualquer prolongamento da vida útil de seus blocos produtivos.

Figura 9 – Área exploratória disponível para as operadoras no Brasil, por rodada



Fonte: RABELLO, 2012.

1.9 Programas Tecnológicos para Melhorar o Fator de Recuperação

1.9.1 Propes - Programa Tecnológico de Óleos Pesados *Offshore*

Ciente da importância de maximizar o potencial dos campos existentes, já descobertos, mesmo aqueles que têm apresentado dificuldades de exploração de seus recursos, como, por exemplo, os campos de óleo pesado, cujas características vêm desafiando as tecnologias existentes para sua recuperação, a Petrobras focou esforços nessa direção. Desde 2002, o Programa Tecnológico de Óleos Pesados *Offshore* (Propes) têm buscado viabilizar e ampliar a produtividade de campos de óleo pesado *offshore*, especialmente em vista do grande volume desse tipo de óleo descoberto nas bacias de Campos e Santos (PETROBRAS, 2002). O Propes busca desenvolver tecnologias inovadoras que permitam a extração do óleo pesado encontrado nas bacias brasileiras *offshore*, e representa um esforço típico da indústria para ampliar o fator de recuperação de campos de baixa produtividade,

onde, em alguns casos, as tecnologias atualmente disponíveis sequer permitem alcançar uma produção mínima.

1.9.2 Pravap - Programa de Recuperação Avançada de Petróleo

Outro programa voltado para melhorar o desempenho dos ativos existentes da Petrobras é o Programa de Recuperação Avançada de Petróleo (Pravap), coordenado pelo Cenpes (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello), da Petrobras. O Pravap foi criado em 1990; seu objetivo principal era intensificar o desenvolvimento de tecnologias para aumentar a produtividade de campos de petróleo em declínio. O Pravap teve sua carteira de projetos complementada e prorrogada em 1997 e 1999, e seu escopo foi sendo ampliado, à medida que a importância de seus objetivos foi reconhecida dentro da estrutura da Petrobras (PETROBRAS, 2006a). Atualmente o Pravap está em sua terceira fase, em que são priorizadas ações estratégicas para melhorar o desempenho da área da sísmica (monitoramento de reservatórios); da área de reservatórios (modelagem geomecânica de reservatórios); e da área de recuperação avançada (otimização da injeção de água, recuperação de óleos pesados, e injeção de gás, polímeros e vapor). Nessa fase estão incluídas ações visando o desenvolvimento de novos produtos químicos, surfactantes e polímeros, e métodos de recuperação microbiológicos, para melhorar o fator de recuperação (PETRÓLEO E ENERGIA, 2012).

Como o principal objetivo do Pravap é disponibilizar tecnologias que promovam o aumento do fator de recuperação, o foco é naquelas que permitam:

- O aumento da injeção e reinjeção de água e de sua disposição final;
- A redução da acidificação microbiana e da incrustação de sais minerais e orgânicos;
- O aumento do fator de recuperação com CO₂ e métodos microbianos;
- A melhora da modelagem 3D de reservatórios complexos;

- O monitoramento 4D do fluxo de fluidos injetados; e
- A gestão de reservatórios em tempo real.

Uns dos principais desafios identificados no Pravap tem sido a melhor compreensão do comportamento dos reservatórios carbonáticos, cujas heterogeneidades afetam a molhabilidade da rocha em relação ao óleo e à água, e conseqüentemente a facilidade de produzir o óleo contido nessas rochas. Para melhor compreender essas rochas, são previstos estudos em laboratório e simulações numéricas em computadores de alto desempenho, de suas características e comportamento. Esses projetos assumem grande complexidade e multidisciplinaridade, que envolvem o estudo de propriedades físicas das rochas; o estudo de rochas análogas encontradas em outras regiões; a modelagem estrutural, de esforços e de recomposição geológica de reservatórios; o estudo de processos microbiológicos atuantes nos reservatórios; e a utilização de técnicas e de softwares de simulação avançada de reservatórios e de rochas, em parceria com fornecedores da mais sofisticada tecnologia de ponta existente (CORRÊA, 2012).

1.9.3 Recage - Programa de Revitalização de Campos com Alto Grau de Exploração

Lançado em 2003, a primeira fase do Programa de Revitalização de Campos com Alto Grau de Exploração (Recage) objetivava alcançar uma melhora significativa em relação a diversos processos envolvidos na produção de campos de petróleo maduros em águas rasas e *onshore* (CORRÊA, 2012). Alguns de seus objetivos específicos eram:

- Aumentar a injeção de água e produção de óleo em até 10% do volume de óleo in situ (OOIP);
- Melhorar as práticas de gerenciamento de reservatórios;
- Otimizar os projetos de injeção de água e de gás;

- Eliminar os gargalos das instalações de produção no campo;
- Otimizar o bombeamento do óleo produzido em sistemas de elevação artificial;
- Reduzir os custos de perfuração e manutenção de poço.

De fato, o Recage conseguiu elevar o fator de recuperação de sessenta campos maduros no Brasil, de 27% para mais de 32%, entre 2004 e 2008. Na sua segunda fase, iniciada em 2009, denominada Recage70, o programa apresentou metas ambiciosas, de alcançar um fator de recuperação de 70% em campos *offshore* menos complexos, a partir de sistemas de produção em plataformas, e de 60% em sistemas de produção submarinos. Para campos *onshore*, as metas envolvem alcançar um fator de recuperação de 70% nos campos menos complexos e de óleo leve, e de 35% nos campos mais complexos e de óleo extra-pesado (CORRÊA, 2012).

Certamente estas metas exigirão desenvolver técnicas de recuperação avançada de petróleo em diversas áreas da produção, e integrar diversas disciplinas, como engenharia mecânica (técnicas de injeção de diversos produtos), engenharia de reservatório (caracterização de reservatórios e monitoramento 4D), engenharia química (uso de polímeros e outros agentes para controlar a vazão no interior de reservatórios), geociências (caracterização de fácies de reservatórios e de suas propriedades), e ciências biológicas e microbiológicas (desenvolvimento de diversas técnicas de MEOR), assim como muitas outras.

1.9.4 Outros Programas

Cada vez mais, os estudos que visam à otimização dos processos produtivos em reservatórios de petróleo e gás estão voltados para compreender melhor os importantes processos biológicos e, inclusive, microbiológicos que ocorrem nesses ambientes. Com custo mais baixo e melhores resultados que a injeção de água, a recuperação avançada do petróleo por métodos microbianos (MEOR) é uma das

tecnologias estudadas pelo Cenpes, e faz parte das prioridades na lista de estratégias de recuperação avançada da Petrobras. MEOR é uma tecnologia embrionária, sobre a qual ainda há pouco entendimento dos mecanismos de recuperação, em razão até mesmo da sua relativamente escassa aplicação pela indústria petrolífera (PETRÓLEO E ENERGIA, 2012).

Ainda assim, a complexidade e a sinergia entre os diversos processos envolvidos torna MEOR uma tecnologia ainda pouco compreendida, cujos mecanismos individuais, atuantes em cada aspecto dos reservatórios, do óleo e dos demais componentes das instalações de produção, precisam ser mais bem estudados e entendidos. Por isso há tantos estudos voltados para essa área no Cenpes, que fazem parte de diversos projetos e programas. Outras empresas e países também têm estudado MEOR através de diversos programas que avaliaram, separadamente, o desempenho de algumas das inúmeras técnicas de MEOR que têm sido sugeridas. Um estudo realizado com base em dados do Norwegian Petroleum Directorate (NPD), do desempenho de diversas tecnologias de recuperação avançada de petróleo, considerou MEOR uma das três tecnologias com maior potencial para permitir o aumento das reservas da Noruega, através do aumento do fator de recuperação de seus campos petrolíferos (AWAN, TEIGLAND, KLEPPE, 2008).

Também na Noruega, o Centre for Integrated Petroleum Research (CIPR) tem estudado técnicas de MEOR sob seu programa de pesquisa aplicada de exploração avançada de petróleo e armazenamento seguro de CO₂. O CIPR produziu diversos relatórios sobre técnicas de MEOR voltadas para, entre outros objetivos: a redução da tensão interfacial entre a água e o óleo nos poros de rochas de reservatórios da Noruega; o controle dos processos de corrosão causados pela atividade microbiana de bactérias redutoras de sulfato (BRS, ou SRB – *sulfate reducing bacteria*); e a recuperação de óleo de reservatórios carbonáticos sob o efeito de técnicas de injeção de micro-organismos (CIPR, 2012).

Na América do Sul, desde a década de 1980 a Venezuela já havia percebido a importância de desenvolver seu domínio das tecnologias de MEOR para poder monetizar suas enormes reservas de petróleo extra-pesado do cinturão de Orinoco. Em 1988, o Ministério de Energia e Minas de Venezuela assinou um acordo com o Departamento de Energia dos EUA para desenvolver técnicas de MEOR em

conjunto (US DOE, 1988). Com o distanciamento político entre a Venezuela e os EUA, a partir da ascensão do presidente Hugo Chavez, essa parceria não se sustentou. Entre dezembro de 2002 e fevereiro de 2003, a Venezuela passou por um período de grandes conturbações em sua indústria de petróleo e gás, na chamada crise da PDVSA, em que a greve dos petroleiros da empresa estatal levou o presidente Chavez a demitir grande parte de seu contingente de profissionais. Ainda assim, a Venezuela, através do braço tecnológico de pesquisa e desenvolvimento da PDVSA, INTEVEP SA, e da Fundación Instituto de Estudios Avanzados (IDEA), do Ministério de Ciência e Tecnologia da Venezuela (Ministerio del Poder Popular para la Ciencia y Tecnología), continuou as pesquisas voltadas para o avanço das técnicas de MEOR.

Atualmente, o IDEA desenvolve pesquisas de ponta nessa área, em instalações que receberam elevados investimentos da Venezuela e de parceiros tecnológicos conveniados, como a Statoil, e que incluem vários prédios com laboratórios sofisticados e bem equipados, e com amplo contingente de pesquisadores dedicados aos estudos de MEOR em suas diversas vertentes (Figura 10). Em 2009 o IDEA promoveu o evento "2nd International Course on Biotechnology and Petroleum", do qual o autor participou como palestrante e docente (IDEA, 2009a). Prova da pujança das atividades de pesquisa e desenvolvimento nessa área é que o evento conseguiu atrair e reunir especialistas de diversos países, incluindo os EUA, Noruega, Alemanha, Rússia, UK, Brasil, Argentina, e México, que apresentaram o estado da arte em MEOR em diversos países e empresas. Devido aos aspectos de MEOR considerados estratégicos, os trabalhos não foram divulgados, e todo o evento transcorreu em ambiente de máxima segurança, nas instalações do IDEA. Essa iniciativa é uma demonstração clara da importância estratégica que MEOR assumiu para certos players da indústria do petróleo no mundo, inclusive com implicações para a política nacional, em relação ao desenvolvimento de tecnologias que podem sustentar e alavancar essa indústria no longo prazo.

Figura 10 - Fundación Instituto de Estudios Avanzados (IDEA), do Ministério de Ciência e Tecnologia da Venezuela, em Caracas, Venezuela



Fonte: O autor.

2 RECUPERAÇÃO AVANÇADA DE ÓLEO – EOR

2.1 Os Fatores que Impulsionam EOR

Em 1978, muitos dos campos petrolíferos americanos já estavam no estágio de avançada maturidade exploratória, e muitos já sofriam forte declínio de sua produção. Essa situação dos campos produtores americanos, juntamente com a elevada dependência do país em relação ao petróleo importado, especialmente dos países da OPEP, trouxe grande preocupação ao Congresso americano. O Office of Technology Assessment (OTA), um braço técnico dentro da estrutura do Congresso americano, foi encarregado de avaliar a situação da produção de petróleo nos EUA. Essa avaliação concluiu que centenas de bilhões de barris de óleo nos EUA representavam recursos petrolíferos que não podiam ser produzidos, pois sua recuperação era economicamente inviável com as tecnologias disponíveis à época. Esses recursos, ou seja, o petróleo presente em determinados reservatórios, mas que não pode ser extraído economicamente, foram chamados de “petróleo encalacrado” (*stranded oil*) por alguns analistas da indústria de petróleo e gás (REVISTA PIAUÍ, 2009). O relatório do OTA avaliou diversas técnicas de EOR (*Enhanced Oil Recovery*) para permitir a produção desse óleo, e considerou que as técnicas de injeção de CO₂ apresentavam grande potencial de atingir esse objetivo (COOK e MASON, 2012).

Para os grandes detentores de petróleo encalacrado, ou seja, de recursos de difícil recuperação através das técnicas disponíveis, o incremento da produção proveniente da aplicação de técnicas de EOR é comparável ao crescimento de suas reservas através de campanhas exploratórias exitosas. Em províncias petrolíferas maduras, frequentemente há bom conhecimento de suas características geológicas e de outros parâmetros que afetam o desempenho de sua produção. Isto pode fazer com que a expansão das reservas através de técnicas de EOR seja mais fácil do que através de novas campanhas exploratórias. Esta realidade já foi constatada em muitos campos maduros dos EUA, como no Oeste do Texas, e do Canadá, como em Saskatchewan (COOK e MASON, 2012).

Alguns estudiosos sugerem que as técnicas de injeção de CO₂, somente no Canadá, têm o potencial de produzir 165Gb de óleo adicional dos seus campos atuais (BABADAGLI, 2006). O fato de que uma técnica de EOR consagrada, como a injeção de CO₂, tenha chegado a ser tão amplamente utilizada, e de seu potencial ser julgado tão favoravelmente, sugere que outras técnicas de EOR menos estudadas, possivelmente também tenham potencial semelhante. A certeza da existência do óleo justifica mais estudos nesse sentido, pois o risco não se refere à existência ou não do petróleo, e sim apenas à forma como poderá ser extraído. Ainda assim, é importante lembrar que as técnicas de injeção de CO₂ para fins de sequestro de carbono não são as mesmas das de injeção de CO₂ como uma técnica de EOR, e essas técnicas ainda estão mais longe de serem completamente dominadas.

Diversos grandes *players* da indústria de petróleo no mundo fornecem estimativas próprias ou da International Energy Agency (IEA) sobre o efeito de um aumento do fator de recuperação na indústria de petróleo. A Total considera que um aumento de 5% no fator de recuperação dos campos petrolíferos mundiais resultaria em 300Gb adicionais de reservas recuperáveis (TOTAL, 2008). A ExxonMobil (EXXONMOBIL, 2009) cita uma estimativa da IEA em que calcula que se o fator de recuperação médio no mundo passasse de 35% para 50%, os recursos recuperáveis dos campos atuais duplicariam. A Shell (SHELL, 2012) cita a mesma IEA, dizendo que 300 bilhões de barris poderiam ser adicionados aos recursos recuperáveis dos campos atuais se o fator de recuperação fosse maior do que a média atual de aproximadamente 35%. As fontes dessas citações do IEA não foram encontradas diretamente nos trabalhos publicados pela IEA em seu site (<http://www.iea.org>), mas evidentemente está claro que os grandes players da indústria de petróleo reconhecem o potencial de EOR para aumentar significativamente os recursos recuperáveis dos campos atuais, sem ter que investir em novos esforços exploratórios. Essa possibilidade de extrair grandes volumes adicionais de petróleo e gás é um forte estímulo ao investimento em tecnologias que permitam aumentar o fator de recuperação em relação aos níveis atualmente atingidos com técnicas de recuperação primária e secundária (recuperação convencional).

Durante sua fala na Rio Oil & Gas Conference and Exhibition 2012, realizada no Rio de Janeiro, de 17 a 20 de setembro de 2012, o Superintendente de Jazidas da colombiana Ecopetrol, Sr. Jaime Orlando Castañeda estimou que a revitalização

de campos maduros em todo o mundo (utilizando métodos de EOR) pode resultar em um acréscimo de 25 milhões de barris de petróleo por dia em até 30 anos, quantidade equivalente ao volume estimado gerado por novas descobertas nesse período (TN PETRÓLEO, 2012).

Recentemente foi realizada em Abu Dhabi uma conferência internacional sobre a recuperação avançada de petróleo (“Enhanced Oil Recovery World Congress 2012”). A organizadora desse evento (Terrapinn Holdings Ltd.) realizou uma pesquisa entre os participantes, cuja composição era principalmente de empresas de petróleo e de prestadoras de serviços para essa indústria, que responderam sobre sua visão em relação aos fatores que têm impulsionado as diversas técnicas de recuperação avançada de petróleo (EOR), incluindo MEOR – *Microbial Enhanced Oil Recovery* (TERRAPINN, 2012b).

Os resultados dessa pesquisa sugerem que uma grande motivação da indústria de petróleo para investir em EOR tem a ver com a possibilidade de aumentar a produção atual dos campos já em produção. De fato, 69% dos respondentes indicaram que já utilizam algum método de EOR, e a maioria indicou que pretende ampliar os investimentos nessa tecnologia nos próximos cinco anos.

Reconhecendo que EOR envolve tecnologia e técnicas ainda em desenvolvimento, e que muitas técnicas ainda não estão consagradas na indústria de petróleo, ou não são totalmente dominadas pelas empresas de petróleo, 82% dos respondentes indicaram que buscam parceiros ou fornecedores especializados, com conhecimento e experiência nessa área, para poder levar adiante projetos de EOR. Dessa forma, há o reconhecimento de que, em geral, serão as empresas de serviços da indústria de petróleo que terão oportunidades, e até preferência, para desenvolver e aplicar novas técnicas de EOR. Isso representa outro forte fator que impulsiona o investimento em EOR – novas oportunidades de negócios para empresas especializadas em EOR. Como muitas das técnicas de EOR são passíveis de serem desenvolvidas por pequenas e médias empresas, não somente pelas grandes empresas da indústria de petróleo, um grande salto tecnológico está ocorrendo e beneficiando muitos empreendedores. É possível que EOR traga de volta à indústria de petróleo o empreendedorismo como uma grande força motriz da inovação e da criação de riqueza. Muitas das técnicas de EOR podem ser desenvolvidas, e de fato estão sendo desenvolvidas, em muitos países ao mesmo tempo e em diversas vertentes, de forma distribuída geograficamente, e numa

escala mundial menos concentrada nos antigos polos de tecnologia da indústria de petróleo, tradicionalmente concentrados nos EUA e no Reino Unido.

Em relação aos investimentos convencionais na E&P, na indústria de petróleo, a grande vantagem dos investimentos em EOR é que é possível desenvolver conhecimento e criar uma base de serviços relacionados, mesmo em países em que não há grandes quantidades de recursos de petróleo e gás, convencional ou não convencional. No caso da E&P de petróleo, não faz sentido investir onde não há expectativa da existência de acumulações que possam ser eventualmente monetizadas. Mas as técnicas de EOR representam uma oportunidade de negócios em qualquer país do mundo, ou para qualquer empresa que queira investir nessa tecnologia, pois seu produto, um *know-how* especializado, pode ser vendido e utilizado em qualquer outro país, em qualquer parte do mundo.

A pesquisa da Terrapinn encontrou que 96% dos respondentes acreditam que os projetos de EOR vão aumentar nos próximos dois anos, confirmando essa visão de EOR como um negócio promissor. Mas também está claro o potencial de EOR como meio de alavancar os benefícios econômicos da produção de petróleo em regiões com grande e consagrada produção de petróleo, como o Oriente Médio, pois os respondentes indicaram essa região como a que teria o maior potencial de aplicação das técnicas de EOR.

2.2 Objetivos

Quando um campo petrolífero entra em produção, à medida que aumenta o número de poços e se amplia o histórico de produção, diminui a incerteza sobre o OOIP (volume original do óleo *in situ*), devido à possibilidade de se realizar cálculos de balanço de material. O fator de recuperação possível de ser alcançado com os métodos de produção empregados também aumenta. Na fase madura da produção, técnicas de extrapolação da curva de declínio, ou modelos matemáticos para o ajuste do histórico da produção, podem ser utilizadas, permitindo uma estimativa bastante exata da produção acumulada final (MEZZOMO, 2006c).

Com os conhecimentos adquiridos durante esta fase, é possível implementar medidas de recuperação avançada mais ousadas, pois diminui a incerteza em

relação aos parâmetros do campo e prováveis resultados dos métodos a serem utilizados. Ainda assim, técnicas de EOR podem ser implementadas desde o início da produção, especialmente em casos onde os parâmetros do campo sugerem que a produção seria inviável ou apenas marginal, se essas técnicas não fossem usadas.

Os objetivos do emprego das técnicas de EOR são os mesmos de qualquer técnica de produção de óleo e gás – maximizar a produção e o fator de recuperação do óleo e gás presentes em um reservatório (OOIP). Iniciar esforços de EOR, portanto, pode ser entendido como o desejo de passar para uma nova condição de operação do campo, em que a curva de produção definida pela experiência operacional adquirida possa ser modificada através da aplicação de novas técnicas de produção. O aumento da produção atual tem reflexos positivos no fluxo de caixa do campo, e o aumento do fator de recuperação inicialmente previsto pelas projeções dos dados históricos da produção implica em um retorno financeiro adicional. Como nos reservatórios em geral o fator de recuperação é bastante baixo, próximo de 32% em média, no mundo, a utilização de técnicas de EOR tem como principal foco a atuação nessa significativa parcela do OOIP, ou seja, nos campos marginais e maduros (TOTAL, 2008).

Especificamente, o principal objetivo do emprego das técnicas de EOR está relacionado com a busca de um aumento no VPL (Valor Presente Líquido) da produção esperada do campo ou reservatório em questão. Como esse aumento no VPL se dá em cada caso depende do tipo de problema que se está buscando minimizar, e do método de EOR empregado. Em alguns casos resulta da aceleração da produção, de sua extensão no tempo, da redução de custos de produção, da redução de outros custos associados, ou até uma combinação de todos estes efeitos.

Operacionalmente, outras vantagens também podem ser objetivadas ao empregar determinadas técnicas de EOR, como o desenvolvimento do conhecimento e confiança do método empregado para possível aplicação em outras áreas, ou desenvolvimento da competência e da eficiência das equipes envolvidas, valorizando os recursos humanos da empresa. As empresas que veem o uso de técnicas de EOR como um fator que concede competitividade à empresa, geralmente entendem que haja outros objetivos e benefícios além dos estritamente operacionais, na utilização de novas técnicas em suas operações.

2.3 Campos Marginais

Um defensor do melhor aproveitamento dos campos marginais no Brasil, Jean Paul Prates, diretor executivo da Expetro, tem feito diversas apresentações sobre o tema. Sua abordagem oferece uma forma de compreender os campos marginais, as condicionantes de seu uso, e as dificuldades de seu melhor aproveitamento (PRATES, 2004).

Entre os campos petrolíferos descobertos, Campo Marginal é entendido como todo e qualquer campo de petróleo ou gás, em geral de pequeno porte, cuja lucratividade para a operadora atual se encontra no limiar da viabilidade econômica, e cujos investimentos necessários ao incremento da produção não se justificam dentro dos objetivos e da escala da empresa operadora do campo. Campo Marginal é um conceito econômico, cujos critérios dizem respeito a uma decisão empresarial e fatores econômicos externos, como o preço do óleo, mercado de gás, etc. Entre os fatores que podem determinar essa marginalidade estão:

- Maturidade do campo, ou seja, fase de declínio da produção;
- Pequena produção ou pequena reserva;
- Problemas técnicos associados com a produção;
- Ausência ou precariedade de infraestrutura de escoamento;
- Ausência ou dificuldade de acesso a estruturas de processamento ou ao mercado consumidor;
- Baixa prioridade no plano de investimentos da operadora do campo.

Campo Marginal pode se referir a campos cuja produção acumulada os enquadrou nessa definição (campos antigos), ou campos descobertos, mas cujas características, segundo os critérios econômicos aplicados pela operadora, não chegaram a justificar o início de sua produção.

Campo Maduro, por outro lado, é um conceito técnico associado apenas ao declínio do perfil de produção observado em todos os campos, à medida que ocorre sua exaustão pela produção acumulada. Os campos maduros se enquadram mais

facilmente na categoria de campos marginais, mas nem todo campo marginal é necessariamente maduro (PRATES, 2004).

Em geral, as operadoras dos campos marginais buscam soluções que podem ser divididas em duas abordagens: soluções tradicionais, geralmente adotadas pelas grandes operadoras, ou soluções inovadoras, geralmente associadas às operadoras independentes. As soluções tradicionais envolvem:

- Redução de custos operacionais;
- Redução do aporte de capital;
- Investimento apenas em operações para manutenção da produção;
- Busca de parcerias com outras empresas, *farmouts* ou contratos de serviço.
- As soluções inovadoras envolvem:
 - Novas Tecnologias ou nova gestão;
 - Novos investimentos específicos;
 - Parcerias com fornecedores;
 - Melhor avaliação do risco;
 - Maior flexibilidade e agilidade;
 - Menores custos administrativos e operacionais;
 - Busca por redução na carga tributária ou incentivos à operadora.

Infelizmente, os desafios para atingir o sucesso operacional e econômico na utilização de técnicas de EOR são muitos, e bastante difíceis de serem superados.

2.4 Dificuldades

Nas últimas décadas, o custo de algumas técnicas de EOR têm diminuído, permitindo alcançar uma melhor relação entre o custo operacional e a quantidade adicional de óleo produzido. A evolução do conhecimento sobre o funcionamento de muitas das técnicas de EOR também tem permitido avanços significativos nos resultados alcançados. Mas muitas dificuldades referentes à utilização dos métodos de EOR estão relacionadas a questões de viabilidade econômica, e não a questões

de viabilidade técnica. Em alguns casos, investimentos elevados criam barreiras que impedem essas técnicas de alcançar um retorno aceitável. Em outros casos, custos elevados impedem que algumas técnicas eficazes (conceito técnico) se mostrem eficientes (conceito econômico). Infelizmente, devido a essa realidade, as técnicas de EOR mais utilizadas acabam sendo não as mais promissoras, do ponto de vista do potencial de ampliação do fator de recuperação de um campo de petróleo, mas aquelas que demonstram mais consistência nos resultados (mesmo se não forem espetaculares) e menor risco econômico, com base em menor variabilidade da expectativa de retorno econômico (MANRIQUE, GURFINKEL e MUCI, 2004). Atualmente, praticamente a única técnica de EOR que se enquadra nesta categoria é a da injeção de CO₂, enquanto outras técnicas promissoras acabam não sendo implementadas.

Entre os grandes desafios tecnológicos da utilização de técnicas de EOR, Prates (2004) já listava as seguintes:

- Frequente isolamento operacional dos campos;
- Tributação elevada em relação à receita esperada;
- Baixa atratividade para investidores;
- Baixo poder de negociação das pequenas e médias empresas que se enquadram como as mais interessadas na utilização de EOR em campos marginais e maduros;
- Baixos preços de comercialização do óleo em relação aos custos operacionais;
- Altos custos de transporte e serviços;
- Falta de conhecimento sobre as técnicas envolvidas e seu potencial.

Segundo Jean Paul Prates, no caso brasileiro, especificamente, há outras dificuldades adicionais:

- Falta de confiança nas regras da ANP, em relação à utilização de EOR e em relação aos campos marginais e maduros;

- Demora por parte da Petrobras, como proprietária e operadora dos ativos, para avaliar se continua a operar seus campos marginais e maduros, ou se os devolve ou vende para que outras empresas os explorem;
- Desejo da Petrobras de continuar a utilizar campos marginais ou maduros como campos para treinamento ou experiências, em vez de devolver esses campos à ANP para que fiquem disponíveis para outros players da iniciativa privada;
- Relutância gerencial por parte da Petrobras em desistir ou abandonar campos para outra operadora, devido às consequências para os gestores desses ativos;
- Falta de confiança por parte da ANP na capacidade de novas operadoras alcançar maior eficiência ou produção, ou simplesmente operar em menor escala, de forma eficiente;
- O conceito de parceria ou consórcio foi aceito para os projetos da “Rodada Zero” mas não para os campos marginais;
- O fato de restar apenas a alternativa “venda de ativos” levou à obrigatoriedade de processo licitatório, mais difícil de efetivar;
- A insegurança foi incrementada com a participação atabalhoada (precoce) da ANP em fase interna do processo;
- Falta de atratividade diante das condições contratuais exigidas pela Petrobras para seus campos (preço de compra do óleo), e do ambiente operacional desfavorável.

De fato, essas dificuldades resultaram no insucesso do Programa de Venda de Ativos de Produção da Petrobras, em que houve 52 empresas interessadas em 73 campos agrupados em 11 projetos, no leilão de março/abril de 2001, mas apenas dois lances foram feitos. Esses lances resultaram na venda de apenas dois projetos: um na Bahia, adquirido pela W. Washington por US\$7 milhões, representando 400 bopd; e outro em Alagoas, adquirido pela Marítima por US\$6 milhões, representando 500 bopd (PRATES, 2004). De lá até o presente momento, não houve novas oportunidades de disputar campos marginais ou maduros da Petrobras, a única detentora desses ativos, ou de participar de rodadas de licitações da ANP que

incluíssem tais campos, até que foi realizada a 12^a rodada da ANP, em novembro de 2013 (ANP, 2013d).

2.5 Técnicas de Recuperação Avançada Atualmente Empregadas

Há uma diversidade muito grande de técnicas de EOR. Em geral elas se dividem em métodos térmicos, métodos químicos, métodos miscíveis, e outros, classificação que engloba os métodos de MEOR, tratados separadamente.

Também há uma importante diferença entre a aplicação de técnicas dirigidas à melhora ou otimização da produção de um único poço de petróleo, por exemplo, em relação à operação de um campo petrolífero inteiro, que requer um maior e mais complexo processo de modelagem das técnicas a serem consideradas, e sua possível aplicação.

À medida que o conhecimento e a confiança em relação às técnicas de EOR aumentam, é mais comum a implementação de técnicas de EOR de forma integrada em todo um campo petrolífero, assim como sua aplicação desde mais cedo no processo produtivo (SCHLUMBERGER, 2012). A busca pela maximização do FR final, em vez da busca pela maximização dos lucros imediatos, permite uma maior e mais racional exploração no longo prazo. O planejamento do ciclo de vida de um poço ou campo petrolífero envolve a realização de pesquisas, testes e estudos apropriados, que permitam que as técnicas de EOR mais apropriadas possam ser utilizadas na época certa, e cada vez mais cedo no ciclo de vida. O objetivo é maximizar as reservas eventualmente recuperáveis (URR – *ultimate recoverable reserves*).

Para descrever a dinâmica da produção, no caso em que técnicas de recuperação avançadas são aplicadas no reservatório, é necessário modificar a modelagem multifásica simplificada, descrita no Capítulo 1, para que possam ser consideradas todas as diferentes fases envolvidas, e as diferentes interfaces possíveis. Neste caso, no reservatório coexistem a água intersticial, as gotículas de óleo, as moléculas de gás, e os demais produtos e compostos que existem ou foram introduzidos no reservatório como parte da técnica de recuperação avançada utilizada. São inúmeras combinações possíveis de interações entre fases, rocha e

demais produtos, que dificultam muito a modelagem adequada dos processos produtivos, e mais ainda a possibilidade de dirigi-los na direção desejada para alcançar os objetivos desejados.

Dada a importância para a modelagem e o desempenho da produção, das interações que podem ocorrer nas diversas combinações interfaciais possíveis ou existentes no reservatório, especialmente no caso de haver diversas fases e outras complexidades, vários centros de pesquisa e desenvolvimento se dedicam praticamente exclusivamente a esse tema (UFSC, 2012; CIRE, 2012; CIPR, 2012).

Na recuperação avançada de um reservatório, ainda se trabalha com o OOIP, mas desse OOIP a produção anterior, com técnicas de produção primária e secundária, reduziu a quantidade de óleo remanescente disponível para ser produzido. Assim, o reservatório atualmente apresenta apenas uma saturação residual de óleo (S_{or} – *residual oil saturation*). O óleo produzido com as técnicas de recuperação avançada se denomina o óleo adicional recuperado – AOR (*additional oil recovery*), definido em termos absolutos ou relativos. O significado de AOR depende do contexto, pois é comum ser utilizado tanto para descrever valores absolutos (em bbl) como relativos (razão ou percentual). Essas relações são descritas da seguinte forma:

OOIP (*original oil in place*) = volume de óleo inicialmente saturando o reservatório

S_{or} (saturação residual de óleo) = $(OOIP - P_{cum})/OOIP$

AOR em termos relativos = $(P_{ter})/(OOIP * S_{or})$

AOR em termos absolutos = $(AOR \%) * (OOIP * S_{or})$

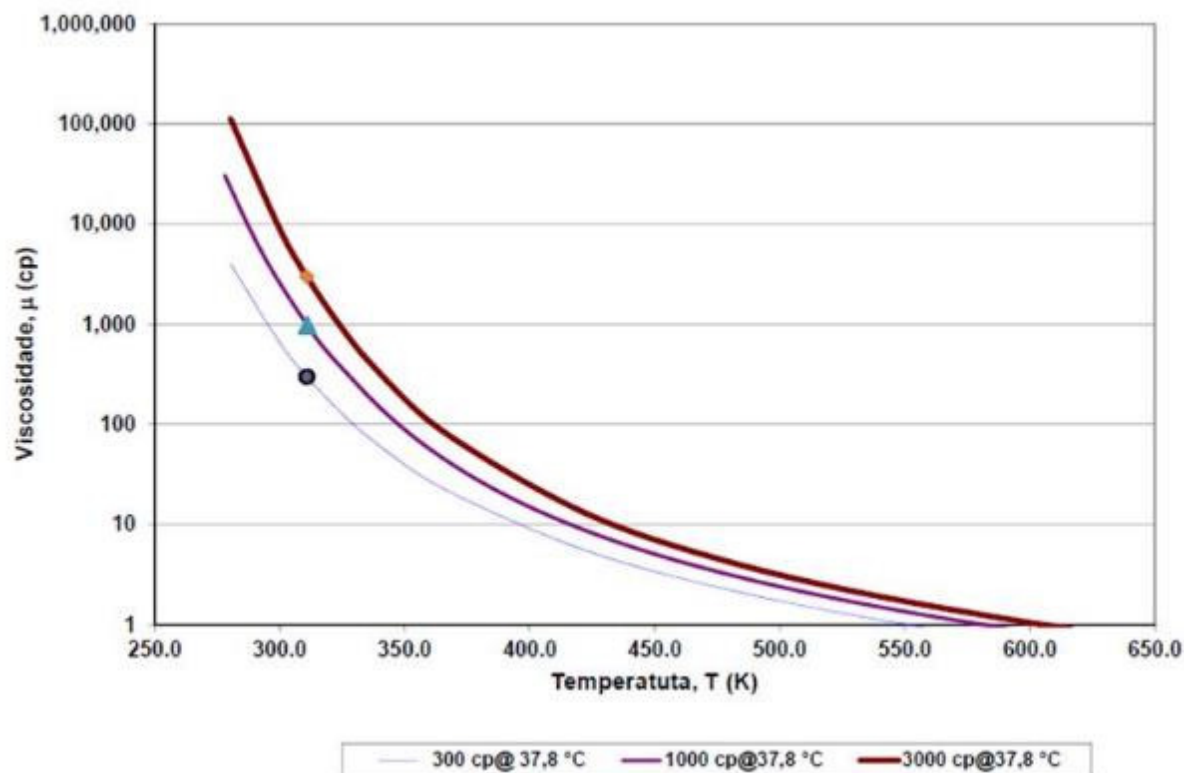
Onde P_{cum} é a produção acumulada até o presente, e P_{ter} é a produção adicional obtida com as técnicas de recuperação avançada utilizadas (a denominação do termo tem origem na descrição dessa produção como sendo a produção com recuperação terciária).

2.5.1 Métodos Térmicos

Os métodos térmicos se dividem entre os que envolvem a injeção de calor nos reservatórios onde se encontra o óleo, e os que envolvem a geração de calor *in situ*. Para a injeção de calor são usados o vapor de água, água aquecida, ou gases quentes. Para a geração de calor *in situ* há uma grande diversidade de técnicas que geram calor, como a combustão *in situ*, através da injeção de ar e/ou outros agentes oxidantes; aquecedores elétricos; equipamentos que geram campos eletromagnéticos que aquecem a região desejada; e muitos outros.

As técnicas de EOR que envolvem métodos térmicos geralmente são bastante eficazes, pois o calor representa um poderoso efeito de redução da viscosidade do óleo, facilitando sua produção (BARILLAS, 2005). Como pode ser visto na Figura 11, um aumento de 100°C (equivalente a 100 graus Kelvin) na temperatura de um óleo em condições de reservatório, pode resultar na redução da viscosidade por um fator de até cem vezes (de 3000 cp para apx. 30 cp, de 1000 cp para aproximadamente 10 cp, ou de 300 cp para aproximadamente 5 cp). Adicionalmente, há outros mecanismos através dos quais o calor facilita a recuperação do óleo, como a destilação, o deslocamento miscível, a expansão térmica, a alteração da molhabilidade, o craqueamento térmico, e a redução da tensão interfacial (MEZZOMO, 2006d).

Figura 11 – Comportamento da viscosidade de três tipos de óleo pesado

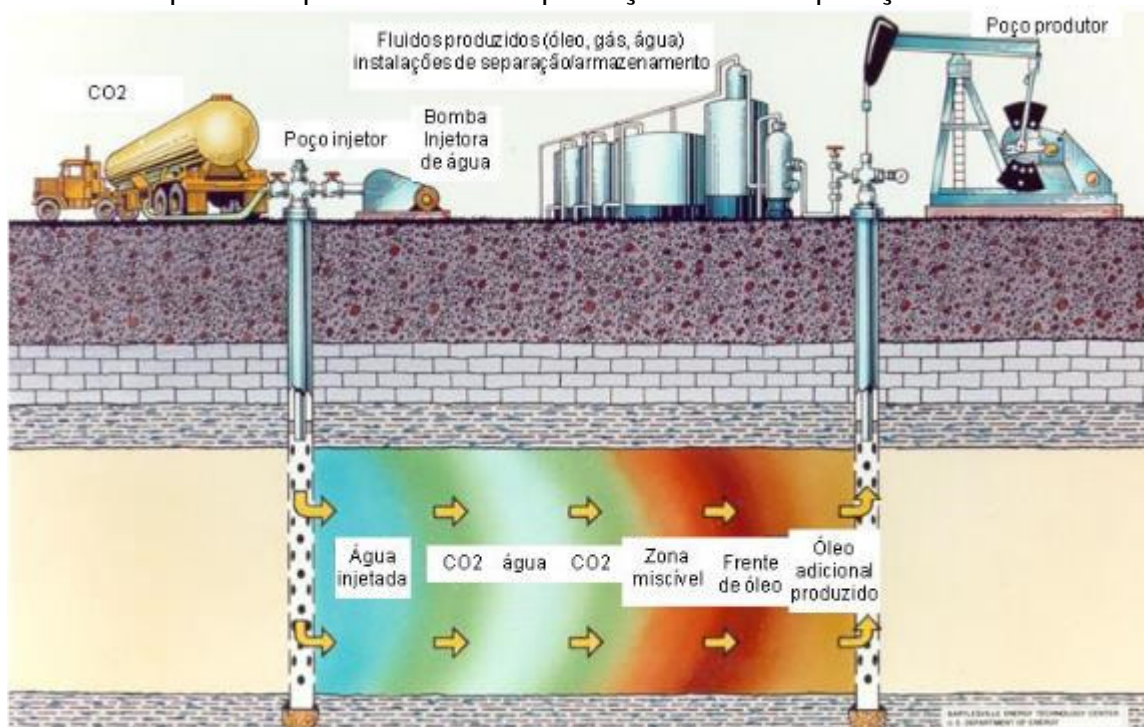


Nota: O gráfico mostra a viscosidade de três óleos pesados, com diferentes viscosidades iniciais nas condições em que se encontram no reservatório (37,8°C, aproximadamente 310 K), ao serem aquecidos.

Fonte: ARAÚJO, 2012.

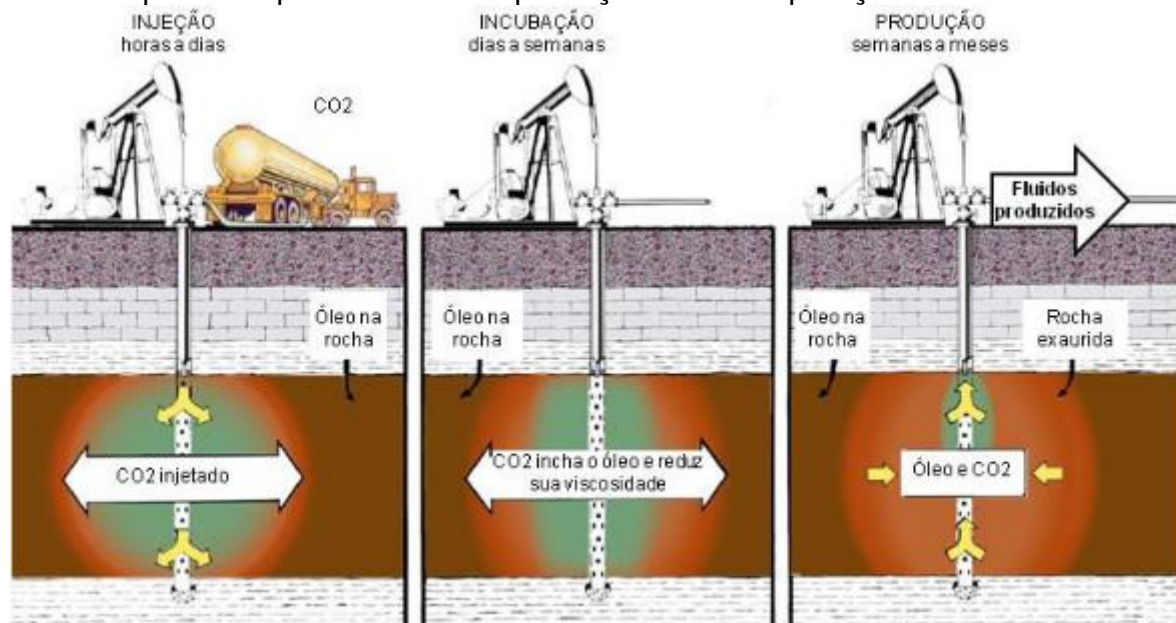
Nos métodos que envolvem a injeção de calor ou alguns produtos específicos, forma-se uma frente que se propaga, desde o poço de injeção até o poço produtor. À medida que essa frente se desloca através do reservatório, o óleo aprisionado dentro dos poros da rocha reservatório passa a fluir mais facilmente e é também deslocado em direção ao poço de produção (Figura 12). Nos casos em que o mesmo poço serve de injetor e produtor (injeção cíclica), pois a injeção e produção ocorrem alternadamente a partir do mesmo poço, essa frente se propaga radialmente a partir do poço por onde foi realizada a injeção, e posteriormente realiza um deslocamento inverso, voltando ao poço, desta vez como produtor, trazendo o óleo mobilizado (Figura 13).

Figura 12 – Frente de deslocamento típica de métodos contínuos de injeção de calor ou produtos para estimular a produção com recuperação terciária



Nota: Neste caso é representada a frente de avanço do CO₂ injetado continuamente.
Fonte: Modificado de NETL, 2006.

Figura 13 - Frente de deslocamento típica de métodos cíclicos de injeção de calor ou produtos para estimular a produção com recuperação terciária



Nota: Neste caso é representada a frente de avanço do CO₂ injetado de forma cíclica.
Fonte: NETL, 2006.

Os efeitos secundários do calor também são fatores no funcionamento do mecanismo miscível, pois o calor vaporiza alguns hidrocarbonetos mais leves, que

por sua vez agem como produtos miscíveis. O calor também é um fator no mecanismo de craqueamento, pois com elevadas temperaturas ocorre o craqueamento de algumas moléculas de hidrocarbonetos mais pesados em hidrocarbonetos mais leves, menores, que podem fluir mais facilmente. O mecanismo de destilação se dá por conta do vapor que pode destilar parte do óleo aprisionado. O mecanismo de expansão térmica também pode ocorrer porque o aquecimento do óleo aumenta seu volume e conseqüentemente sua pressão, forçando sua expulsão do reservatório. Os mecanismos de modificação da molhabilidade e da redução da tensão interfacial entre o óleo e as paredes dos poros da rocha do reservatório também podem ser resultado do aquecimento do óleo (TELEDYNE ISCO, 2012).

2.5.1.1 Injeção de Vapor

Na injeção de vapor, o calor disponibilizado pelo vapor injetado é composto pelo calor sensível, oriundo da variação de temperatura da água desde a temperatura ambiente até a temperatura de vaporização, e pelo calor latente, oriundo da vaporização da água (transformação em vapor). Esse calor é absorvido pela rocha e óleo, de forma mais ou menos eficiente, de acordo com as condições do reservatório e das técnicas e equipamentos utilizados. Podem ocorrer elevadas perdas térmicas, especialmente se o óleo estiver em reservatórios profundos, o que implica em maiores perdas até chegar ao destino, mesmo com medidas de isolamento térmico das tubulações de injeção. Há, também, ineficiências relacionadas ao aquecimento não desejado da rocha, em vez do óleo.

A principal consideração em relação a essas técnicas se refere a sua economicidade, já que o calor necessário para aquecer o óleo nos reservatórios exige um elevado insumo energético. É praticamente impossível aquecer o óleo que se deseja produzir, sem também aquecer a rocha do reservatório e incorrer em elevadas perdas térmicas, o que significa que muito mais calor é necessário do que apenas para aquecer o óleo até o ponto em que possa fluir facilmente.

Outra preocupação é a ambiental, já que há necessidade de grande número de poços de injeção que ocupam grandes áreas, inviabilizando sua ocupação e

utilização para outros fins. A geração de vapor pode consumir recursos hídricos escassos, e em regiões de *permafrost*, é importante proteger a superfície contra o degelo, no caso de reservatórios próximos à superfície. O elevado consumo energético também representa uma significativa perda de eficiência energética da extração, além de gerar elevadas emissões de gases de efeito estufa, oriundos da combustão para geração de vapor (PTTC, 2012).

Ainda assim, um dos métodos térmicos de EOR que mais tem crescido ultimamente é a SAGD (*Steam Assisted Gravity Drainage* – drenagem por gravidade, assistida por vapor). É principalmente utilizada na produção de óleo pesado e de recursos não convencionais, tais como as areias betuminosas do Canadá (OSDG, 2012). O fator de recuperação que pode ser atingido com o método SAGD pode chegar a 60% ou 70%, e a razão óleo/vapor fica entre 0,50 e 0,30, dependendo da eficiência do sistema (JIMENEZ, 2008).

Os métodos de injeção de vapor mais utilizados envolvem a injeção contínua (*steam flooding*) ou cíclica (*huff and puff*) de vapor, além de SAGD. Apesar de seu sucesso no Canadá, SAGD tem tido pouco êxito em outros países com recursos de óleo pesado, onde essa técnica poderia ser útil, como a Venezuela, Indonésia, países da antiga União Soviética, Omã, Brasil, China, Trinidad e Tobago, e outros países (KOKAL e AL-KAABI, 2010). Ainda assim, no Brasil, o Campo de Carmópolis tem sido referência no uso de injeção de vapor para estimular a produção de petróleo.

2.5.1.2 Combustão *in situ*

A combustão *in situ* envolve a injeção de ar e/ou outros agentes oxidantes, os quais ao entrar em contato com o óleo em condições de reservatório causam sua ignição e queima parcial, produzindo calor e gases de combustão; os gases de combustão complementam o efeito térmico com um efeito miscível e sua expansão ajuda a expelir o óleo do reservatório. Tais métodos têm sido utilizados no Canadá, Índia, Romênia e nos EUA, mas principalmente em reservatórios areníticos (KOKAL e AL-KAABI, 2010). Diversas variantes existem para tais métodos, e apesar de serem geralmente eficazes na geração de calor, o principal problema é seu controle

e sua eficiência energética. Também em relação ao método de combustão *in situ*, o Campo de Carmópolis é referência no uso desse método no Brasil, através da injeção de ar para promover a combustão de parte do próprio óleo do campo, para estimular a produção de petróleo.

A transformação de óleo pesado em frações mais leves com métodos térmicos de EOR envolvendo a combustão *in situ* busca uma redução da viscosidade devido ao aquecimento do óleo a ser produzido. Nesses métodos, como na de injeção de vapor, também ocorrem transformações químicas do óleo, devido ao calor. Especialmente em altas temperaturas, como no caso da combustão *in situ*, ocorre o que acontece nos processos convencionais de refino, onde, além da separação das frações presentes, frações mais pesadas são transformadas em frações mais leves. Teoricamente, com o uso da pirólise *in situ*, por exemplo, seria possível alcançar uma eficiência de recuperação do óleo até maior do que a eficiência de transformação que seria possível alcançar aquecendo o óleo produzido em instalações na superfície, onde a transformação pode chegar a 65%-70%. Isso se deve ao fato que o aquecimento *in situ* pode liberar óleo que não foi transformado, mas apenas aquecido, e dessa forma a recuperação do óleo *in situ* pode alcançar 75% ou mais (KARANIKAS, 2012).

2.5.2 Métodos Miscíveis

Os principais métodos miscíveis são a injeção de produtos que exibem miscibilidade com o óleo, como GLP; nafta; solventes orgânicos líquidos; gás pobre (metano), geralmente à alta pressão; gás rico (com condensados); CO₂ (gás carbônico); gases de queima (*flue gas*); nitrogênio; e outros. Dependendo das pressões do reservatório em que se encontra o óleo, os métodos miscíveis mais comuns são a injeção de CO₂, nitrogênio e hidrocarbonetos leves, para deslocar o óleo.

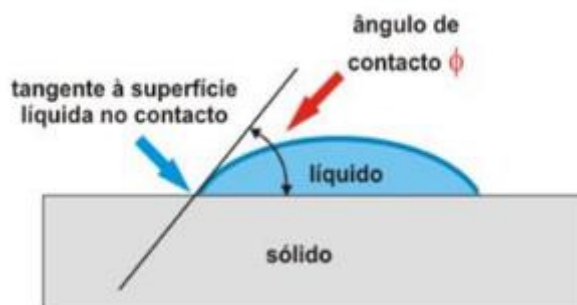
Os métodos miscíveis se baseiam na injeção de fluidos miscíveis com petróleo. A miscibilidade pressupõe a solubilidade mútua entre os dois fluidos, em quaisquer proporções, o que resulta numa recuperação significativamente maior do

que com os métodos que não envolvem a miscibilidade (MEZZOMO, 2006c). Isto se deve aos seguintes mecanismos:

- Em nível macroscópico, a miscibilidade entre os fluidos promove a estabilidade no avanço da interface entre os dois fluidos, já que se trata de somente um fluido com somente uma fase – óleo com CO₂ dissolvido;
- Em nível microscópico, a miscibilidade entre os fluidos impede a retenção de óleo residual na zona varrida pelo fluido deslocante, pois evita uma separação entre ambos os fluidos, o que permitiria que o óleo fique para trás, como no caso da injeção de fluidos com mobilidade maior do que a do óleo (geralmente água ou gás), que fluem mais facilmente, deixando áreas com óleo sem ser varridas.
- O ganho no fator de recuperação através da injeção de um fluido parcialmente miscível com o petróleo se deve aos seguintes efeitos inerentes à solubilidade:
 - Diminuição da tensão interfacial;
 - Inchamento do óleo (diminuição do fator de volume de formação do óleo, pois seu volume nas condições do reservatório aumenta em relação ao volume na superfície);
 - Redução da viscosidade do óleo;
 - Alteração da molhabilidade.

A molhabilidade é uma qualidade de um líquido em contato com uma superfície sólida, que mede sua afinidade para molhar essa superfície. Ela é medida pelo ângulo do contato do líquido, como na Figura 14.

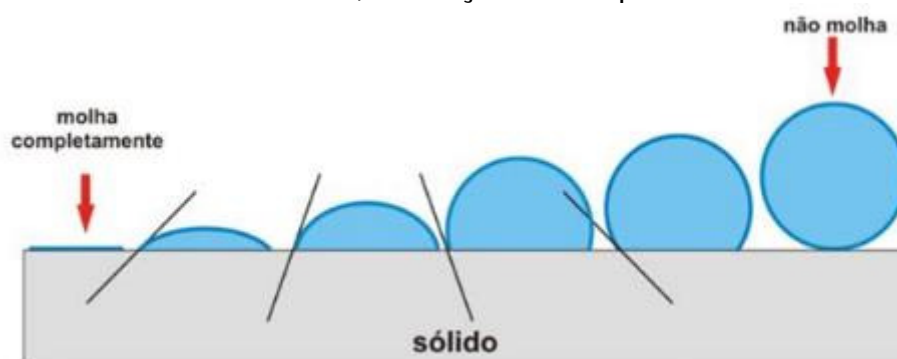
Figura 14 – A molhabilidade de um líquido medida pelo ângulo de contato com uma superfície sólida



Fonte: ALHANATI, 2012.

Quando um fluido, como o óleo, tem elevada molhabilidade em relação à rocha do reservatório, ele tem mais afinidade à superfície sólida e é mais difícil de deslocar dessa superfície, para que seja produzido. Para facilitar sua produção, o objetivo de um método miscível é reduzir essa molhabilidade, através da adição de produtos miscíveis com o óleo, que reduzem a molhabilidade da mistura resultante, em relação à molhabilidade original do óleo. Isso permite que as gotículas de óleo (agora uma mistura miscível) se desprendam mais facilmente da superfície que molham. Esse efeito pode ser representado, como na Figura 15, por uma mudança de molhabilidade causada pela introdução de um produto miscível com o óleo, que muda a situação do óleo no reservatório, de um estado como à esquerda, para outro mais à direita.

Figura 15 – Efeito na molhabilidade, da adição de um produto miscível com o óleo



Nota: Neste caso se observa a mudança de uma situação como à esquerda, para outra como à direita, de forma que o óleo pode se desprender da rocha mais facilmente.

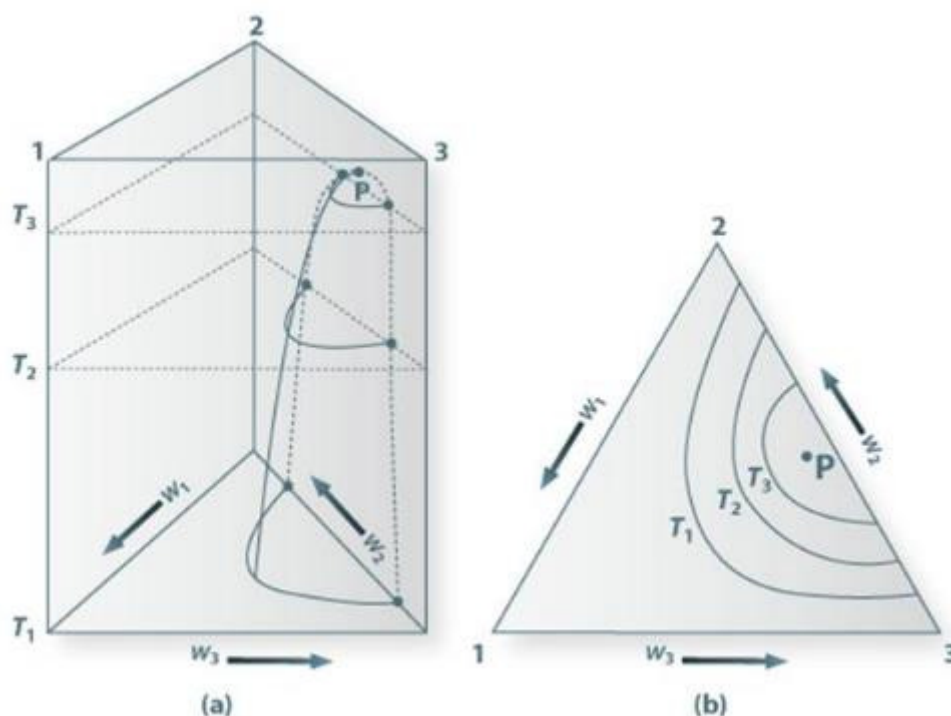
Fonte: Adaptado de ALHANATI, 2012.

No caso da injeção de um fluido miscível num reservatório de petróleo, o sistema pode ser considerado um sistema complexo de multi-componentes. O

petróleo é uma mistura de vários componentes de diferentes pesos moleculares, que podem ser agrupados em dois ou três grupos (e.g.: C1, C2-C6, C7+) para facilitar a representação de seu comportamento. O fluido miscível injetado pode ser considerado como um desses componentes. Dependendo do conjunto das variáveis termodinâmicas desse sistema de fluidos (petróleo mais fluido miscível), o contato entre eles pode levar à situação ideal da miscibilidade total, em que somente existe uma fase, a qual exhibe propriedades de fluxo que favorecem a recuperação máxima do óleo contido no reservatório (MEZZOMO, 2006c).

O comportamento dos sistemas multi-componentes pode ser representado por diagramas pseudo-ternários esquemáticos, que descrevem o comportamento de três diferentes componentes (e.g.: componente 1, 2 e 3, ou fluido miscível, frações leves do petróleo e frações pesadas do petróleo); as possíveis misturas (w_1 - mistura de 1 e 2, w_2 - mistura de 2 e 3, e w_3 - mistura de 1 e 3); e as regiões de miscibilidade parcial e total, para uma determinada temperatura e pressão. Indo um passo além, uma representação dos diagramas pseudo-ternários para diferentes temperaturas (e.g.: T1, T2 e T3) pode ser feita como uma extensão 3D destes (Figura 16). Em temperaturas acima da temperatura do ponto P, o sistema é homogêneo, ou seja, monofásico, com miscibilidade total. Esta seria a situação ideal da miscibilidade total dos fluidos. À medida que aumenta a temperatura, a solubilidade mútua dos componentes geralmente aumenta, devido à agitação molecular, e a área bifásica nos diagramas triangulares (pseudo-ternários) fica cada vez mais reduzida, até que condições são atingidas em que somente existe uma fase.

Figura 16 - Diagrama ternário esquemático do comportamento de três compostos



Legenda: As três possíveis misturas (mistura de 1 e 2 - w_1 , mistura de 2 e 3 - w_3 , e mistura de 1 e 3 - w_2) dos compostos 1, 2 e 3.

Nota: Em (a), se observa o comportamento, para uma determinada pressão, de três compostos (1, 2, 3) nas suas possíveis misturas. A região de miscibilidade total para diferentes temperaturas (eixo vertical) está na região externa às curvas que representam as misturas. Em (b) se observa a projeção das curvas de miscibilidade (solubilidade) em diversas temperaturas. Em temperaturas acima da do ponto P, o sistema é homogêneo (monofásico, com miscibilidade total).

Fonte: LOBO e FERREIRA, 2006, apud LABVIRTUAL, 2012.

No reservatório, as condições de temperatura e pressão que permitem a mistura óleo/fluido deslocante atingir a miscibilidade total são as condições ideais para favorecer a produção máxima do óleo contido no reservatório, portanto, nos métodos miscíveis, se busca operar em condições de pressão e temperatura num diagrama pseudo-ternário, onde os fluidos são totalmente miscíveis. Considera-se atingida a pressão mínima de miscibilidade quando a recuperação atinge valores superiores a 90% do OOIP, ou quando aparece uma fase de transição entre gás e óleo no efluente produzido.

2.5.2.1 Injeção de CO₂

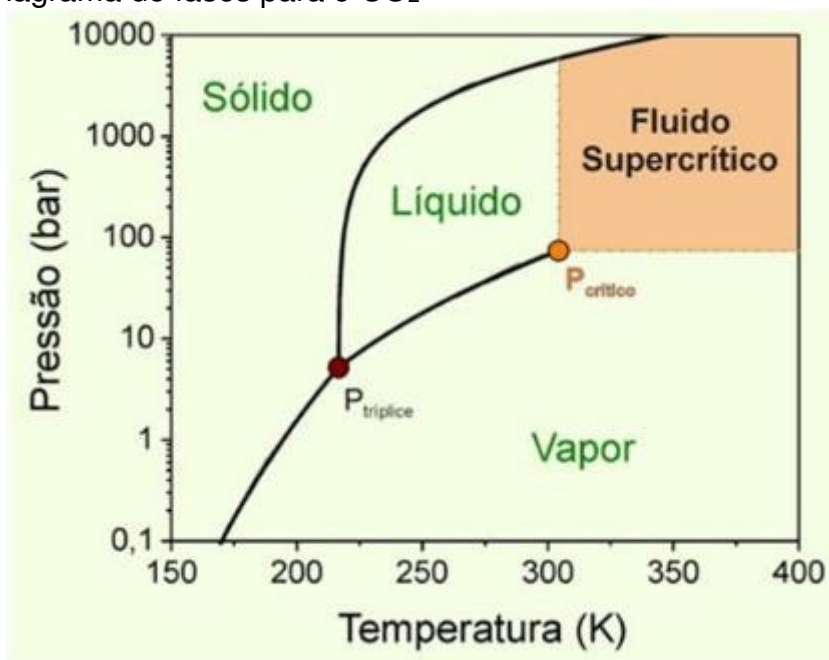
No caso da injeção de CO₂, uma das técnicas dos métodos miscíveis, apesar da pressão mínima de miscibilidade do CO₂ ser relativamente elevada, sua injeção em reservatórios de petróleo é um dos métodos de recuperação avançada mais atrativos. O CO₂ apresenta comportamento de fases mais favorável do que o metano (menor área bifásica no diagrama pseudo-ternário); tem elevada solubilidade; tem alto poder redutor da viscosidade do óleo; tem alto poder de inchamento do óleo (aumento da pressão do reservatório); tem densidade e viscosidade superiores às do gás natural (vantajoso do ponto de vista da razão de mobilidade e da segregação gravitacional no regime de escoamento sob miscibilidade parcial); pode atingir a miscibilidade via múltiplos contatos; quando não se trata de CO₂ reinjetado, ainda assim geralmente há ampla disponibilidade a custos relativamente baixos (MEZZOMO, 2006b).

A técnica de injeção de CO₂ tem como fundamento a miscibilidade entre fluido deslocado (óleo) e o fluido deslocante, que neste caso é CO₂ (BRADLEY, 2009). Na injeção de CO₂, ocorrem processos que modificam as condições dos fluidos nos reservatórios, como mudanças de fase do óleo e CO₂; solução do CO₂ no óleo; alteração da viscosidade do óleo; alteração das tensões interfaciais entre o óleo e a rocha do reservatório; maior mobilidade do óleo dentro dos poros; e reações geoquímicas impulsionadas pela introdução do CO₂. Em casos onde a técnica é empregada sob cuidadosas avaliações das condições do reservatório e dos fluidos, são modeladas e estimadas as mudanças dos contatos de miscibilidade que ocorrerão quando o CO₂ for injetado. Podem ocorrer contatos múltiplos de miscibilidade, especialmente se outros fluidos estiverem presentes. A modelagem do comportamento dos fluidos permite desenvolver um diagrama ternário esquemático representativo do sistema, que por sua vez permite observar o efeito da adição de CO₂, e o ponto em que ocorre a miscibilidade total.

Com grande importância para os reservatórios brasileiros, na injeção de CO₂ podem ocorrer vários processos que facilitam a extração do óleo de reservatórios em que se encontra aprisionado. O CO₂, dependendo das condições de temperatura e pressão, pode se encontrar na fase gasosa, líquida, sólida ou como fluido supercrítico (Figura 17). Quando o CO₂ alcança a fase de fluido supercrítico, em que

a temperatura e pressão estão acima do ponto crítico, ele se comporta como um gás, apesar de ter a densidade de um líquido. Nesse caso, o CO₂ se mistura completamente com o óleo (miscibilidade total), reduzindo a tensão interfacial com as paredes da rocha reservatório, fazendo o óleo fluir mais facilmente e ser produzido.

Figura 17 - Diagrama de fases para o CO₂



Nota: Em laranja se observa a região em que o CO₂ se encontra no estado supercrítico – condições de alta temperatura e alta pressão.

Fonte: GPQVA, 2012.

O CO₂ apresenta grandes vantagens em relação à água superaquecida, por exemplo, já que ele alcança a condição de fluido supercrítico acima de uma temperatura relativamente módica de 31 °C e 74 bar (aproximadamente 75kg/cm²), enquanto a água somente alcança esta condição acima de 374°C e 221 bar (aproximadamente 225kg/cm²), exigindo, portanto, muito mais energia para realizar o mesmo efeito sobre o óleo.

O CO₂ também pode ajudar na produção do óleo aprisionado em poros da rocha reservatório, através de outros mecanismos, como a redução da viscosidade do óleo, e por conta do aumento do volume (inchamento) da mistura do óleo e CO₂, que ajuda a impulsionar o óleo para fora dos poros.

O Departamento de Energia dos EUA (US-DOE), em relatório preparado por seu National Energy Technology Laboratory (NETL), garante que a técnica de

injeção de CO_2 (*CO₂ flooding*) representa uma oportunidade que o governo dos EUA quer incentivar, pois acredita que vários fatores se juntaram para criar essa situação favorável:

- Avanços alcançados na implementação dessas técnicas, que têm garantido melhores resultados e maior consistência nos resultados obtidos;
- Preços elevados do petróleo, que favorecem a economicidade de projetos que envolvem tecnologias alternativas de aumento da produção;
- Custos reduzidos, que minimizam o risco para as operadoras que decidem implementar projetos de EOR;
- Exigências ambientais, que favorecem técnicas que oferecem benefícios ambientais associados (como o sequestro de carbono).

De fato, a injeção de CO_2 é a técnica de EOR que mais tem crescido nos EUA, e já em 2005 representava 4% da produção de óleo dos EUA. O potencial de recuperação adicional de óleo por meio da técnica de injeção de CO_2 é estimado pelo US-DOE, através da Energy Information Administration (EIA), em 650 mil bopd, a partir de 2030, e o total de óleo produzido com essa técnica entre 2011 e 2035 deve chegar a mais de 4Gb (EIA, 2012). O Center for Climate and Energy Solutions (C2ES), uma associação de grandes empresas que busca promover a adoção de medidas para evitar mudanças climáticas que poderiam prejudicar seus próprios negócios, estima que as técnicas de injeção de CO_2 já produziam 277 mil bopd em 2011, e que poderiam mais que quadruplicar essa produção até 2033, mantendo esse patamar (mais de 400 milhões de barris por ano) por muitos anos (C2ES, 2012a). Outros analistas estimam que inovações tecnológicas nas técnicas de injeção de CO_2 poderiam disponibilizar mais de 40 bilhões de barris adicionais somente em algumas bacias nos EUA (KUUSKRAA, 2010), enquanto outros estimam que essas técnicas possam produzir mais de 1,7 milhões de bopd em 2030 (BRADLEY, 2009), e eventualmente atingir uma recuperação total acumulada de 40Gb (JAIN, 2010).

2.5.3 Métodos Químicos

Os métodos químicos de EOR têm sido impulsionados por grandes avanços no conhecimento sobre o funcionamento dos métodos que envolvem o uso de produtos químicos e seu comportamento em campo, em relação aos testes em laboratório. Surfatantes baratos e eficazes substituíram produtos caros que exigiam grandes quantidades para serem eficazes (PTTC, 2012). A maioria dos métodos químicos de EOR utilizam surfatantes para obter efeitos de redução de tensão interfacial entre o óleo e as paredes dos poros da rocha do reservatório, ou polímeros para aumentar a viscosidade da água injetada, utilizada para fazer a varredura do óleo.

Devido à importância dos surfatantes e polímeros para os métodos químicos de EOR, cabe uma breve descrição geral do funcionamento destes produtos.

2.5.3.1 Surfatantes

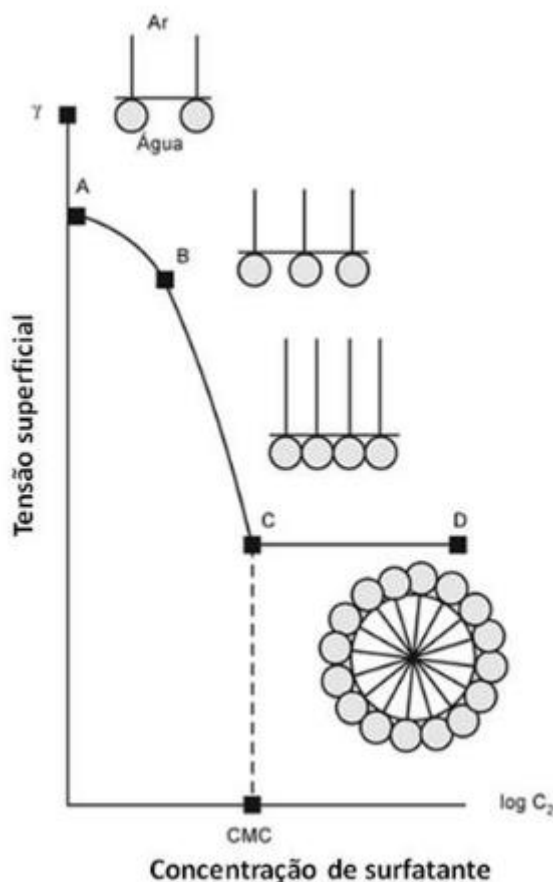
Os efeitos básicos que se busca alcançar com o uso de surfatantes químicos injetados em reservatórios, é combater a baixa produção de óleo devido a sua elevada viscosidade, ou devido a sua adesão às paredes da rocha, dentro dos poros do reservatório. Os surfatantes ajudam no emulsionamento do óleo, pois as emulsões fluem mais facilmente para fora do reservatório do que o óleo em fase pura. As emulsões são basicamente dispersões compostas por dois fluidos não miscíveis, mas que são mantidos em dispersão estável devido à ação de um agente estabilizante, como um surfatante, na interface. As micelas que se formam, devido à adição dos surfatantes, permanecem em suspensão mais facilmente, enquanto as gotículas de óleo em uma fase pura aderem umas às outras, e às paredes da rocha do reservatório.

Os surfatantes são produtos que agem sobre a superfície de determinados produtos. Assim como o sabão, sua principal característica é a de suas moléculas terem uma parte lipofílica e outra hidrofílica. Dessa forma, numa mistura contendo água e óleo, por exemplo, em que o meio dispersante é a água e o óleo representa

uma fase não miscível, as moléculas de um surfatante se ligam à interface entre os dois líquidos, criando gotículas de óleo em vez de uma fase contínua, e transformando a mistura numa emulsão estável. A ação dos surfatantes, também chamados tensoativos, é de redução da tensão superficial, que permite a formação de micelas coloidais estáveis, com regiões internas e externas diferenciadas. No caso de uma mistura de óleo em água, as micelas são cobertas de surfatante com suas extremidades hidrofílicas para fora, mas isso também funciona na situação inversa, onde o meio dispersante é o óleo – nesse caso serão formadas micelas de água, rodeadas de surfatante com suas extremidades lipofílicas para fora.

As moléculas de um surfatante são geralmente representadas por um círculo (extremidade hidrofílica) conectado a uma seção de linha reta ou em curva (extremidade lipofílica). Os surfatantes podem ser aniônicos, catiônicos ou não iônicos, dependendo do tipo de comportamento de suas extremidades ativas (se são ânions, cátions ou não iônicas). O efeito da adição de um surfatante numa mistura de água com óleo pode ser visto na Figura 18. À medida que mais surfatante é adicionado, primeiro (região entre A e B) ocorre a redução da tensão superficial na interface água-óleo, por ocupação da interface pelas moléculas do surfatante. Com maior concentração de surfatante (região entre B e C), a interface água-óleo fica saturada de surfatante e a tensão superficial alcança o valor mínimo. Acima da concentração micelar crítica (CMC) de surfactante (que ocorre em C), as moléculas de surfatante entram na fase líquida, e começam a formar as micelas de óleo, situação onde ocorrerá a emulsificação (região de C em diante).

Figura 18 - Efeito da concentração de um surfatante numa mistura de água com óleo



Nota: À medida que mais surfatante é adicionado, as moléculas de surfatante começam a ocupar a interface água-óleo, reduzindo a tensão superficial (região entre A e B). Com maior concentração de surfatante (região entre B e C), a interface água-óleo fica saturada de surfatante e a tensão superficial alcança o valor mínimo. Após a tensão superficial atingir o valor mínimo (concentração = CMC, em C), micelas de óleo começam a se formar, situação onde ocorrerá a emulsificação (região de C em diante).

Fonte: Adaptado de NETZ e ORTEGA, 2008.

A ação dos surfatantes envolve efeitos como a emulsificação, a solubilização, a suspensão, a redução de aderência, formação de espumas, a dispersão de uma fase, e outros efeitos semelhantes. Os efeitos específicos obtidos são determinados pelo tipo de surfatante, forma de aplicação, e tipo de óleo envolvido, o que permitiu o desenvolvimento de uma grande variedade de produtos para diferentes fins (KIWI WEB, 2011).

No método químico de EOR envolvendo o uso de surfatantes, eles reduzem a tensão superficial do óleo, pois são adsorvidos na interface das duas fases (água e óleo), rompendo as ligações que antes mantinham o óleo em uma fase única. Na fase óleo, as gotículas de óleo apresentam elevada aderência entre si e com as paredes da rocha, em nível microscópico, nos poros do reservatório, impedindo que

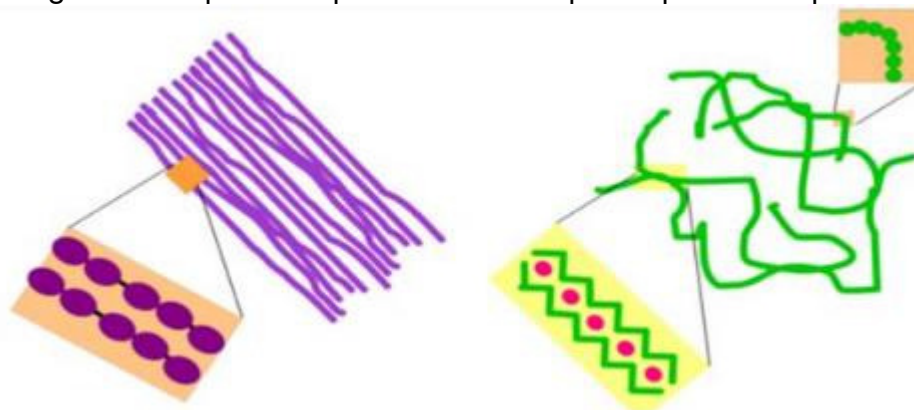
seja produzido facilmente. Com a adição de surfatantes, são formadas micelas que se movimentam mais facilmente nas fases líquidas, ou uma emulsão completa óleo-água, com menor viscosidade. Uma emulsão se desloca mais facilmente através dos poros do reservatório, permitindo que o óleo também seja produzido mais facilmente. Dependendo do tipo de surfatante e de óleo, alguns surfatantes conseguem reduzir a tensão superficial do óleo, e portanto sua viscosidade, em até algumas ordens de magnitude, tornando, assim, o uso de surfatantes muito eficaz no aumento da produção de óleo (FARN, 2008).

2.5.3.2 Polímeros

Os polímeros são grandes moléculas (macromoléculas) formadas de unidades menores (monômeros) em sequências repetitivas. Nos produtos de uso industrial, os polímeros podem chegar a ter milhares de unidades de monômeros em sua estrutura. Polímeros maiores são de difícil manuseio em nível molecular, pois sua longa estrutura os torna suscetíveis a dobramentos e deformações, em relação a compostos formados de pequenas moléculas, que podem mais facilmente se organizar em estruturas cristalinas, regulares. Dessa forma, os polímeros geralmente têm características viscosas, oriundas da dificuldade dessas moléculas se deslocarem entre si. Seu ponto de fusão tampouco é único, já que um complexo de polímeros começa a derreter gradativamente, à medida que mais moléculas se despreendem e atingem a mobilidade da fase líquida.

Os polímeros podem apresentar inúmeros tipos de estruturas, dependendo das unidades menores que os compõem, além de suas propriedades de coesão. Alguns exemplos podem ser vistos na Figura 19, mas estruturas amorfas, tridimensionais e outras também são comuns.

Figura 19 – Alguns exemplos do tipo de estrutura que os polímeros podem assumir



Legenda: Esquerda - segmentos lineares associados lateralmente. Direita – segmentos não lineares, comuns na formação de géis.

Fonte: Adaptado de NTNU, 2012.

Apesar de sua complexidade em estrutura e comportamento, há inúmeros exemplos de polímeros de ocorrência natural, como na madeira (celulose), seda, lã, couro, algodão, borracha, e muitos outros. Suas propriedades dependem das interações (coesão) entre as partes das longas cadeias dessas moléculas. Polímeros com pouca atração intermolecular entre si serão mais flexíveis, e polímeros com estruturas mais regulares e com características cristalinas tenderão a formar conjuntos fibrosos mais rígidos.

Os polissacarídeos são carboidratos com estrutura de polímeros. Os polissacarídeos solúveis em água, de origem natural, são denominados gomas industriais. O polissacarídeo mais importante é a goma xantana, de amplo uso industrial. Desde antes da década de 1950, eles vêm sendo utilizados industrialmente, mas seu uso na indústria do petróleo, especificamente em EOR, cresceu com a disseminação da produção industrial em larga escala, através da técnica de produção microbiana do produto (LUVIELMO e SCAMPARINI, 2009).

A utilidade dos polímeros em EOR reside justamente em suas qualidades viscosas, e essas não exigem necessariamente polímeros com conjuntos de monômeros extremamente grandes. O importante é obter produtos com características de solubilidade, estabilidade em condições de temperatura e pH encontrados em campo, e viscosidade e desempenho adequados para os métodos utilizados.

Geralmente, nos métodos químicos que utilizam polímeros, eles são adicionados à água de injeção para aumentar sua viscosidade e deslocar o óleo mais facilmente, através da redução da diferença da viscosidade entre essas fases,

pois o óleo é mais viscoso que a água de injeção sem polímeros. Um fator que favorece a utilização de polímeros para aumentar a viscosidade da água injetada é que a viscosidade da água após a mistura com polímero é proporcional ao quadrado da concentração de polímero (NMT, 2012). Dessa forma, é relativamente fácil alcançar elevadas viscosidades, e obter água de injeção com viscosidade semelhante ou superior à do óleo a ser produzido, condição necessária para um varrido eficaz desse óleo pela água injetada. O efeito se dá em ambas as escalas microscópica (varrido em escala microscópica, ou mWS - *microscopic Water Sweep*), e macroscópica (varrido em escala macroscópica, ou MWS - *macroscopic Water Sweep*).

A injeção de polímeros está entre os mais importantes e bem sucedidos usos de produtos químicos para alterar as condições de reservatórios, como a presença de fraturas ou caminhos preferenciais, por onde a água injetada se perde e deixa de realizar o varrido desejado. Polímeros e géis também permitem otimizar a aplicação de outros produtos químicos de alto custo, evitando perdas por fraturas ou caminhos preferenciais (TELEDYNE ISCO, 2012). Esses caminhos são literalmente entupidos, ou a solução injetada, com os produtos químicos desejados, é transformada em um fluido mais viscoso, menos propenso a perdas e mais eficaz no varrido.

Combinações de compostos químicos buscam obter mais de um objetivo simultaneamente, mas a interação de produtos químicos entre si e com os diversos produtos presentes no reservatório (óleo, minerais, outros fluidos, etc.) criam uma grande dificuldade para prever exatamente seu comportamento e assegurar seu desempenho. Quando a salinidade é elevada, polímeros são menos eficazes, por exemplo. Espumas geradas por baixas concentrações de surfatantes têm sido usadas para controlar o comportamento de outros fluidos injetados, como nitrogênio (PTTC, 2012).

As aplicações de métodos químicos de EOR têm tido especial êxito em campos petrolíferos da China. Essas experiências têm incentivado outras aplicações, como em Omã (Campo de Marmul) e em outros países. Por outro lado, problemas de baixa eficácia estão associados à utilização de surfatantes em ambientes com alta salinidade ou temperaturas, assim como a utilização de álcalis têm causado problemas de incrustação e emulsionamento, que causam o entupimento de poros. O uso de polímeros tem tido melhores resultados em arenitos, enquanto reservatórios carbonáticos ainda representam um grande desafio

(KOKAL e AL-KAABI, 2010; SCHLUMBERGER, 2013b). Em geral, óleos leves e altas temperaturas criam problemas de compatibilidade entre os produtos químicos introduzidos e os hidrocarbonetos do reservatório, dificultando atingir as modificações desejadas nos fluidos a serem produzidos.

O controle da injeção de água utilizada para realizar a varredura do óleo de reservatórios com óleo viscoso ou de baixa permeabilidade merece uma menção especial, já que esse tipo de aplicação está entre as aplicações de métodos químicos mais utilizada e de melhores resultados. Este método, também chamado de modificação do perfil de permeabilidade (*permeability profile modification*), tem se beneficiado de melhores técnicas de modelagem, aplicável aos poros e à permeabilidade dos reservatórios, e à cinética dos fluidos, para assegurar que essas aplicações tenham êxito em campo. Ferramentas como a sísmica e microssísmica de poços, tomografias das rochas que circundam os poços perfurados, monitoramento de fluxos através de *tracers* químicos, e outras ferramentas, têm facilitado essa modelagem (PTTC, 2012). Mas também tem sido impulsionada pela relativa simplicidade de alguns dos efeitos que se objetiva conseguir – apenas o entupimento de caminhos preferenciais com uma massa mais viscosa. Esse objetivo é favorecido pela tendência natural do fluido injetado de seguir pelos caminhos preferenciais na rocha do reservatório, justamente aqueles que se deseja impedir, forçando a subsequente injeção de água por outros caminhos onde há óleo residual para ser varrido. Esse conceito também se aplica, como será visto adiante, à utilização de técnicas de MEOR que buscam o mesmo resultado – o entupimento de caminhos preferenciais com biomassa (bioflocos) ou polímeros, só que nesse caso os polímeros são gerados *in situ* por meios biológicos (biopolímeros).

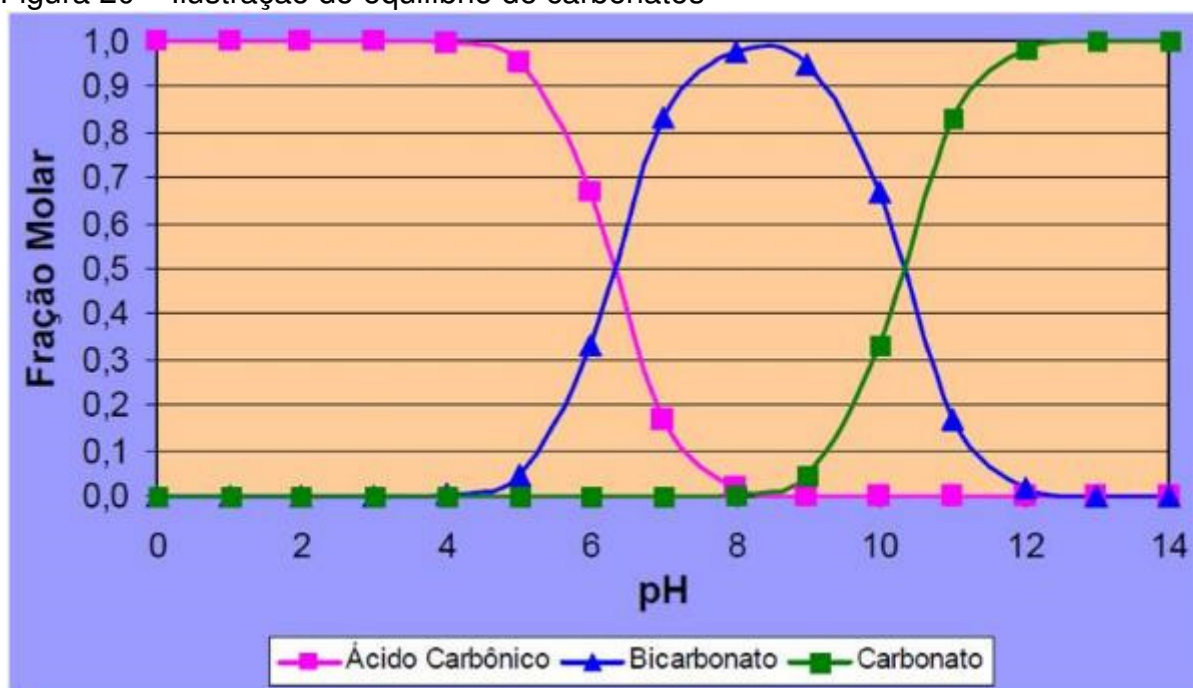
2.5.3.3 Acidificação

Em muitos campos petrolíferos, os reservatórios apresentam permeabilidade variável ou relativamente baixa; especialmente se o óleo for do tipo pesado, com elevada viscosidade, o escoamento fica ainda mais prejudicado. A combinação de uma baixa permeabilidade e de um óleo pesado resulta numa grande dificuldade de produção. Em reservatórios carbonáticos ou com cimentação carbonática, a

acidificação tem sido empregada com sucesso para melhorar a recuperação de óleo desses reservatórios, pois essas rochas são mais suscetíveis à acidificação. A acidificação, através da introdução de diversos tipos de compostos químicos que são, ou geram, ácidos dentro da rocha reservatório, tem tido bastante êxito, pois seus resultados dependem de reações relativamente bem conhecidas.

As rochas carbonáticas são essencialmente compostas por carbonato de cálcio (CaCO_3), na forma de aragonita (forma cristalina romboédrica) ou calcita (forma cristalina ortorrômbica, mais comum), e a cimentação carbonática é basicamente uma acumulação de calcita, uma forma de carbonato de cálcio bastante estável. Devido ao fato que à medida que o pH da água aumenta, o equilíbrio de carbonatos favorece a presença de bicarbonato e carbonato, uma condição mais ácida (menor pH) favorece a solubilização do carbonato (MIERZWA, 2008). Esse equilíbrio de carbonatos pode ser visto na Figura 20, onde abaixo de um pH de 4, praticamente não há carbonato em solução, apenas moléculas de ácido carbônico. Essa condição representa a dissolução dos carbonatos. Dessa forma, quando a produção de óleo de um reservatório apresenta problemas devido à baixa porosidade ou permeabilidade de rochas carbonáticas, ou devido à formação de cimentação cálcica na rocha reservatório, uma técnica frequentemente aplicada é a da acidificação, com o objetivo de dissolver parte dos minerais da rocha e facilitar o fluxo do óleo.

Figura 20 – Ilustração do equilíbrio de carbonatos



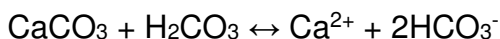
Nota: O gráfico mostra quais espécies predominam em diferentes pH da água. Pode ser visto que abaixo de pH 4, praticamente não há carbonato em solução, apenas moléculas de ácido carbônico.

Fonte: MIERZWA, 2008.

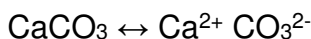
A acidificação também é utilizada em conjunto com outras técnicas de EOR para potencializar o efeito dessas técnicas, como no caso da acidificação aplicada em conjunto com técnicas de fraturamento de folhelhos para ampliar as fraturas criadas hidraulicamente e otimizar sua orientação preferencial (MORSY et al., 2013).

Importantes casos de sucesso têm sido relatados para o uso de acidificação química em reservatórios de campos petrolíferos brasileiros. A dissolução de carbonatos e outros compostos, como sulfatos (BaSO_4), permitiu que a acidificação revertesse a queda de produção do campo de Bijupirá, na Bacia de Campos, que havia caído de 40 mil para 8 mil bopd. Após os tratamentos com a injeção de ácidos, assim como cuidados em relação ao controle da corrosão, etc., a produção voltou para um patamar de aproximadamente 24 mil bopd (BOGAERT et al., 2008).

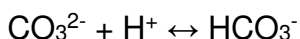
As reações envolvidas na técnica de acidificação química são conhecidas, e a dissolução do carbonato de cálcio pode ser representada pela seguinte equação de equilíbrio de carbonatos (LOPES e MONTEIRO, 2010):



Onde, numa primeira fase, o carbonato de cálcio se dissocia:



Numa segunda fase, os íons de carbonato reagem com os íons de hidrogênio da água:



Numa terceira fase, o dióxido de carbono na água reage, formando ácido carbônico:



Caso o equilíbrio de carbonato não seja bem controlado, pode ocorrer a precipitação de carbonato, o oposto de sua dissolução:



O uso de técnicas que envolvem a acidificação de rochas de reservatórios tem apresentado bastante sucesso, mas geralmente têm sido usados ácidos fortes, como o ácido clorídrico (HCl) ou fluorídrico (HF), que podem agir relativamente rápido (SCHLUMBERGER, 2006; SCHLUMBERGER, 2010). Uma das desvantagens do uso desta técnica é a periculosidade dos produtos utilizados, pois além de altamente corrosivos, podem representar graves riscos à saúde, se manuseados incorretamente, ou em caso de acidentes. Ácidos mais fracos e menos perigosos não têm sido empregados por não apresentarem resultados tão rápidos, mas essa possibilidade não está descartada, especialmente no caso de ácidos produzidos por micro-organismos introduzidos nos reservatórios, como na técnica de bioacidificação.

Também existem efeitos colaterais do uso desta técnica, pois é possível que os minerais dissolvidos se precipitem outra vez, à medida que a concentração dos ácidos empregados seja reduzida por diluição ou distanciamento do ponto de injeção. Como em qualquer técnica de EOR, o controle desses e quaisquer outros efeitos indesejados é um desafio, mas o uso de diversos produtos químicos, como quelantes, tamponadores e outros, permite minimizar danos e problemas na aplicação dessas técnicas (SCHLUMBERGER, 2010).

Analisando a experiência acumulada dos EUA na utilização de técnicas de EOR, está claro que uma grande parcela (cerca de 40%) desses projetos é desenvolvida em reservatórios carbonáticos, além de muitos outros em folhelhos, mas cuja aplicação busca atuar nos minerais carbonáticos. Quanto a novos projetos de EOR, estudos sugerem que o grande potencial está nos reservatórios carbonáticos Permianos (MANRIQUE, GURFINKEL e MUCI, 2004).

Um dos aspectos importantes da acidificação química, ou seja, através da injeção de compostos químicos (ácidos) nos reservatórios, é que além de ser relativamente bem sucedida e compreendida, serve de modelo para esforços semelhantes com técnicas de MEOR, como será visto mais adiante.

2.5.4 Outros Métodos

Outras técnicas de EOR atualmente descritas na literatura são principalmente combinações dos métodos anteriormente descritos, e algumas técnicas que envolvem diferentes formas de atingir aqueles mesmos objetivos.

Também há relatos de operadores que vêm utilizando gases geralmente tidos como gases miscíveis, como o CO₂ e o nitrogênio, em processos de estimulação que não envolvem a miscibilidade. Nesses casos, esses gases basicamente são utilizados para manter a pressão dos reservatórios e assim manter ou incrementar a produção de óleo. Da mesma forma, há relatos de operadores que utilizam misturas de hidrocarbonetos, também tidos como miscíveis, em processos de estimulação que não envolvem a miscibilidade, onde podem estar exercendo outras funções que não se dissolver no óleo a ser produzido com o intuito de tornar sua viscosidade menor (O&GJ, 2012).

Muitas inovações em relação à combinação de diferentes métodos de EOR têm resultado em importantes avanços, à medida que se amplia o conhecimento em relação à interação de diversos efeitos. Um exemplo é a técnica de ASP (*Alkali-Surfactant-Polymer*), que envolve a injeção de misturas sequenciais ou simultâneas de produtos alcalinos, surfatantes e polímeros. Neste processo, o surfatante adicionado permite que a mistura injetada penetre até os poros onde se encontra o óleo aprisionado na rocha reservatório; nesse ponto, os produtos alcalinos reagem

com as gotículas de óleo, formando surfatantes *in-situ* que facilitam o escoamento do óleo, e também reduzem a adsorção dos surfatantes, necessitando menores concentrações; finalmente, o polímero na mistura aumenta a viscosidade do fluido injetado, evitando perdas por caminhos preferenciais (OIL CHEM TECHNOLOGIES, 2012; SURTEK INC, 2012). Essa é uma demonstração da complexidade que as técnicas de EOR atingem, e da necessidade de compreender e controlar diferentes processos que atuam simultaneamente, para alcançar os objetivos desejados.

Adicionalmente, as técnicas de MEOR são consideradas métodos de EOR que não se enquadram nessas classificações, e que serão tratadas separadamente.

Alguns métodos inovadores de recuperação terciária nem sempre podem ser classificados de acordo com um mecanismo de atuação específico, pois os princípios operantes nem sempre são bem entendidos, ou envolvem mais de um efeito. Esses métodos geralmente envolvem algum tipo de estimulação física, conseguida através de meios como fontes de emissões sônicas ou eletromagnéticas, emitidas em diferentes regiões do espectro sônico ou eletromagnético (SEN, 2008). Ondas eletromagnéticas com frequências de rádio, micro-ondas e outras frequências têm sido propostas. Até métodos que envolvem vibrações físicas geradas mecanicamente, com ondas elásticas, ou impactos físicos fortes, foram relatados (ELLINGSEN, 2002).

Alguns métodos propostos são realmente esdrúxulos. Desde a década de 1940, e especialmente na década de 1960, auge da Guerra Fria, um programa russo (*Nuclear Explosions for the National Economy* – Explosões Nucleares para a Economia Nacional) já propunha o uso de explosões nucleares para estimular a produção de petróleo, entre outros objetivos, apesar de que os detalhes de seu funcionamento não estavam sequer bem desenvolvidos conceitualmente (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2010). Os EUA também desenvolveram, durante as décadas de 1960 e 1970, o programa Plowshare, que propunha o uso de explosões nucleares para estimular a produção de hidrocarbonetos através de diversos mecanismos, além de vários outros objetivos relacionados com o aproveitamento, armazenamento, etc. do petróleo. No caso russo, experimentos com este método foram conduzidos em reservatórios carbonáticos e outros, representando mais de vinte explosões nucleares, possivelmente muitas mais. Infelizmente há poucas informações detalhadas sobre os resultados, mas foram alegados bons resultados em pelo menos alguns desses experimentos (NORDYKE, 1998). Apesar da baixa

contaminação com radiação, a provável resistência pública ao uso de produtos com alguma possibilidade de radiação adicional foi tida como o motivo da suspensão dessas iniciativas.

2.6 Compilações Históricas e Sistemas de Otimização de Aplicação das Técnicas de EOR

Existe um longo histórico de experiências com EOR descritas na literatura, e sempre é possível aprimorar o aprendizado sobre a aplicação de técnicas de EOR em determinada situação, com base nessas experiências. Dessa forma, diversos trabalhos vêm sendo publicados há bastante tempo, apresentando compilações das experiências com EOR relatadas na literatura, inclusive apontando possíveis cenários futuros (LAKE, SCHMIDT, VENUTO, 1992; JAYASKERA, 2002; PTTC, 2002; AWAN, TEIGLAND, KLEPPE, 2008; ALVARADO e MANRIQUE, 2010; PTTC, 2012; e outros). Naturalmente, o tema também tem sido foco de congressos específicos sobre quais e como aplicar determinadas técnicas de EOR em situações específicas, como a de óleos pesados (TERRAPINN, 2012a). A China tem abraçado a utilização de técnicas de MEOR, e vem promovendo diversos eventos técnicos e comerciais para a disseminação dessas tecnologias (SPE, 2006).

Mas além desse foco, outros trabalhos que visam oferecer métodos para otimizar a aplicação das técnicas de EOR também têm sido publicados, empregando diversas abordagens, inclusive modelagem de reservatórios e processos de aprendizado automático, para construir um sistema de apoio à decisão sobre quais técnicas seriam mais adequadas em determinadas situações (GHARBI, 2000; ALVARADO et al., 2002; HOU et al., 2008; SEIXAS, GUIMARÃES e HOROWITZ 2011).

Esse conjunto de iniciativas tem ajudado a disseminar a compreensão e a aplicação das técnicas de EOR, e hoje, vem servindo de modelo para iniciativas semelhantes, em relação às técnicas de MEOR.

2.7 Considerações Estratégicas e Geopolíticas

Na indústria do petróleo, as inovações sempre têm representado um fator de grande importância na competitividade das empresas. Diante da crescente dificuldade e custo para encontrar novas acumulações significativas de recursos convencionais de petróleo e gás, essas empresas estão, cada vez mais, buscando maximizar o aproveitamento dos recursos já descobertos, e as técnicas de EOR assumiram um lugar de destaque entre as inovações tecnológicas da indústria de petróleo. O fato que algumas técnicas já estão consagradas e têm demonstrado bom desempenho, levou as técnicas de EOR em geral a serem vistas positivamente pela indústria de petróleo. Desde algum tempo, instituições como o US-DOE, através do NETL, estão maciçamente apoiando o desenvolvimento de técnicas de EOR, com ênfase naquelas que têm demonstrado melhores resultados e maior potencial estimado, em relação à sua aplicação nos campos petrolíferos americanos (NETL, 2006).

Importantes movimentos que representam interesses industriais buscam estimular a adoção de técnicas de EOR justamente por entenderem que EOR representa uma oportunidade estratégica crítica, do ponto de vista energético, ambiental e econômico, e porque entendem que EOR representa uma forma não somente de conviver com a realidade da matriz energética mundial, que incluirá os combustíveis fósseis por muito tempo, mas tirar alguma vantagem da continuidade do modelo de desenvolvimento atual, associado à extração de recursos fósseis (C2ES, 2012a). O Business Environmental Leadership Council (BELC), que reúne empresas com faturamento de mais de US\$2 trilhões, busca estimular ações em prol do aumento da produção dos campos existentes, através de métodos não convencionais, como EOR. Especificamente, propõe que atividades importantes da agricultura, como a produção de etanol, a produção de fertilizantes e a gaseificação de biomassa com combustíveis fósseis, que atualmente representam elevadas contribuições de gases de efeito estufa, poderiam ser fontes de CO₂ para projetos de recuperação avançada de óleo com técnicas de injeção de CO₂, reunindo vantagens produtivas (maior produção), ambientais (captação e armazenamento de CO₂), e estratégicas (melhora da situação da segurança energética, na relação produção doméstica versus fontes externas, domínio de tecnologias importantes, etc.). Cita,

inclusive, vários exemplos bem sucedidos de iniciativas nesse sentido (C2ES, 2012b).

Também temos amplas evidências de experiências do passado recente, que demonstram como a evolução tecnológica na indústria do petróleo e gás surtiu efeitos significativos no cenário mundial. Desde a década de 1980, o mapa energético mundial foi redesenhado a partir do desenvolvimento de técnicas de exploração e produção em águas profundas, que abriu novas e prolíficas fronteiras produtivas no Golfo do México, na costa Brasileira, na África e em outros países. Essa evolução tecnológica permitiu reduzir a concentração e dependência mundial dos recursos de hidrocarbonetos concentrados no Oriente Médio e na antiga União Soviética, com importantes implicações geopolíticas sentidas até hoje.

Mais recentemente, desde a década de 2000, o desenvolvimento de técnicas de recuperação de recursos energéticos não convencionais, como o *shale gas* (gás no folhelho), através de técnicas de fraturamento de folhelhos que contêm gás aprisionado em rochas de baixíssima permeabilidade, até então impossível de ser produzido comercialmente, também revolucionou o cenário energético mundial. Hoje, os EUA despontam como o país de maior crescimento na produção de gás natural, inclusive deslocando outras fontes energéticas primárias, como o petróleo e o carvão, na matriz energética mundial. O gás natural está ampliando sua participação como fonte energética na produção de energia elétrica, e transformando o país do principal importador de óleo e gás, num possível grande exportador de gás natural, em breve (EIA, 2012).

As implicações geopolíticas dessa nova onda de inovação tecnológica da indústria de óleo e gás, que se fez sentir especialmente na produção de gás natural, já foram sentidas pela Rússia, pelo Brasil, e por outros países. A Rússia viu seu domínio do mercado de gás europeu ser reduzido, assim como sua influência, a partir da redução da demanda por parte dos EUA, cujas importações planejadas pressionariam a demanda mundial, fortalecendo esse grande fornecedor. Hoje, a possibilidade de exportações dos EUA, direta ou indiretamente alimentando o mercado europeu, pressiona para baixo os preços do gás da Rússia e reduz suas perspectivas econômicas em relação a esse mercado. Já estão sendo discutidas as políticas energéticas e as iniciativas concretas de EOR que o país deve implementar, para reagir a essa situação, analisando o potencial e a conveniência de cada técnica

que poderia ser adotada em relação aos seus recursos energéticos (ERNST & YUNG, 2013).

O Brasil também foi duramente afetado pela mudança no cenário internacional do gás natural, que saiu de uma situação de elevados preços nos EUA, para uma situação de superabundância com baixíssimos preços. O Brasil, que cogitava, nos próximos anos, exportar para os EUA grande parte de sua produção projetada de gás natural dos campos do pré-sal, teve que fazer profunda reavaliação de sua política energética em relação ao gás natural. Eliminada a possibilidade de exportar esse gás natural para os EUA, que em poucos anos viram as previsões passar de grandes importações para grandes exportações, o Brasil se viu obrigado a estimular o consumo doméstico tanto quanto possível, para absorver a maior parte do gás natural produzido, e ainda tem dificuldades para equacionar essa produção com o consumo e oportunidades de monetização (DOURADO, JONES, CHAVES, 2010).

No Brasil, as técnicas de EOR já foram entendidas não somente como uma forma de ampliar a produção de determinados campos, mas também como uma tendência histórica que moldou o desenvolvimento dos recursos energéticos no país, e que seguirá influenciando sua indústria energética e seu desenvolvimento econômico. Em 2002, foi realizado um estudo da evolução das técnicas de EOR utilizadas no país, e as perspectivas futuras; nessa época, no Brasil, as técnicas de EOR mais utilizadas ainda eram apenas a injeção de água para suplementar a energia natural dos campos petrolíferos, apesar da gradual introdução de novas técnicas de recuperação avançada, a partir dos anos 1980 (SHECAIRA et al., 2002). Perante essa realidade, o Brasil não pode ignorar a importância de se manter atualizado na pesquisa e desenvolvimento das técnicas de EOR, nem de aplicar essas técnicas de forma a maximizar os benefícios que seus recursos naturais podem gerar.

Segundo Jean Paul Prates, que defende um maior e melhor aproveitamento dos campos marginais brasileiros por pequenas e médias empresas produtores independentes de petróleo e gás, apesar das dificuldades, dos impedimentos institucionais e das barreiras competitivas no Brasil, há um grande potencial de desenvolvimento para os produtores independentes, que teriam as melhores condições de levar adiante e incrementar a produção de petróleo e gás em campos marginais brasileiros, utilizando técnicas de EOR (PRATES, 2004). Os produtores

independentes têm papel importante na indústria do petróleo dos EUA, Canadá, Austrália e outros países com atividades terrestres consolidadas. Os produtores independentes nos EUA representam 300.000 empregos diretos e produção de mais de 700.000 bopd.

Dessa forma, a experiência bem sucedida desses países, em relação à atuação dos produtores independentes, geralmente pequenas empresas, oferece um caminho semelhante para que o Brasil atinja objetivos de desenvolvimento com benefícios econômicos, sociais e estratégicos. Ainda segundo Jean Paul Prates, o desenvolvimento de novos operadores nos campos marginais brasileiros poderia gerar, numa primeira fase, cerca de 6.000 novos empregos diretos. Num segundo momento, o desenvolvimento gradual da indústria de prestação de serviços, fornecimento de equipamentos, apoio, conexões com *downstream*, e outras atividades expandiria ainda mais o mercado de trabalho em torno da produção. Outra peculiaridade é que a atividade propicia a interiorização do investimento, dos empregos e do desenvolvimento tecnológico e social. Finalmente, a operação de campos marginais por produtores independentes, mais dispostos a utilizar as técnicas de EOR em pequena escala, que não interessa às grandes operadoras, permitiria o prolongamento da vida econômica destes campos, resultando na extensão dos investimentos e manutenção dos pagamentos de royalties e pagamentos aos superficiários nessas regiões.

3 MICROBIOLOGIA

3.1 Processos Biológicos – Nosso Desconhecimento

Em relação aos processos biológicos, à dinâmica das comunidades microbiológicas, às suas diversas capacidades, aos fatores que influenciam essas comunidades e processos, e às complexas interações entre esses fatores, nosso conhecimento pode ser descrito como apenas incipiente. A busca pela compreensão dos processos biológicos relacionados com a ocorrência de hidrocarbonetos, sua formação, degradação e demais processos que envolvem sua eventual produção, são objeto de estudo da microbiologia do petróleo, que já se tornou uma disciplina independente (Microbiologia do Petróleo) e atrai ampla atenção dos estudiosos da indústria do petróleo e gás.

Com relação aos fatores que afetam os processos biológicos que conhecemos, muitos dos mecanismos envolvidos, em nível molecular e de células, apenas agora começam a ser compreendidos, e estamos descobrindo que empiricamente são observados processos que jamais poderíamos ter imaginado, e que não podemos explicar satisfatoriamente com o conhecimento atual. Não se trata de questões metafísicas, apenas de uma tecnologia que ainda não dominamos adequadamente. Seria muita pretensão humana julgar que compreendemos perfeitamente o funcionamento de certos processos, apenas porque entendemos um modelo conceitual imensamente simplificado (SHORT, 2005).

Nas últimas décadas, os desenvolvimentos científicos na área da biologia e da bioengenharia, focados na indústria farmacêutica e na medicina, promoveram uma verdadeira revolução na forma como a sociedade percebe os processos biológicos (MENN, EASTER, SAYLER, 2000; SCHNEEGURT e KULPA, 1998; SELVARATNAM et al., 1997). Agora se reconhece que a natureza esconde muitos mais segredos do que jamais se pensava, em sua matriz de fundo mais básica - os processos biológicos realizados por micro-organismos e mediados por sua codificação genética (JONES e ANSELMO, 2005). Mesmo com toda a tecnologia e poder de investigação disponível, através de processos automatizados para

pesquisas, estamos longe de compreender, e muito mais longe de controlar eficazmente, estes processos em sua raiz.

Essa limitação na compreensão do funcionamento dos processos biológicos que encontramos na natureza nos impede de poder prever resultados de intervenções mediadas pelo homem. Menos ainda podemos criar ou escolher tais intervenções de acordo com os objetivos desejados. Ainda assim, já há um enorme conjunto de conhecimento isolado, não integrado, em relação a muitos dos principais processos biológicos que ocorrem em reservatórios de hidrocarbonetos, mediados pelas diversas comunidades ali existentes ou que poderiam ali sobreviver.

Essa é a base para o otimismo em relação à possibilidade do homem conseguir dirigir, adaptar, ou até mesmo criar novos meios de atingir objetivos específicos, visando vantagens econômicas na exploração, exploração e gestão dos reservatórios de petróleo e gás, e até de outros recursos energéticos, como o carvão, hidratos de gás, e outros. Como no caso de EOR, o grande potencial das técnicas de MEOR despertou o interesse da comunidade científica e dos proprietários e operadores dos campos petrolíferos e de gás, onde essas técnicas poderiam ser aplicadas.

Dedicar esforços para encontrar e compreender mais profundamente as soluções de que a natureza dispõe pode resultar em novas soluções ou melhorias em processos de forma mais eficaz do que o uso de toda a engenhosidade humana sequer conseguiu imaginar (BENYUS, 2002). Esses ganhos poderiam ser auferidos se nos voltarmos para buscar entender e aplicar alguns dos processos microbiológicos muito eficientes, mas que vêm atuando sem nosso pleno conhecimento, tanto nas profundezas dos reservatórios de hidrocarbonetos, como na superfície da terra e em outros ambientes. Alguns desses ambientes, como as profundezas dos oceanos e os ambientes frios e isolados dos nossos polos, têm sido considerados como extremos e inóspitos, mas têm se revelado abrigos de uma vibrante vida microbiana.

Parafrazeando Ricardo e Szostak (2009), em sua visão do mundo microbiano e seus mistérios, imaginemos qualquer célula viva - por menor e mais simples que seja, está fervilhando com minúsculas partes que realizam processos que seriam o sonho de todo pesquisador da nanotecnologia poder entender e desenvolver:

À medida que esses “órgãos” internos fazem sua magia, transportando compostos químicos, sintetizando moléculas complexas, construindo partes essenciais da vida, gerando e armazenando energia, enviando e recebendo

mensagens, esses micro-organismos demonstram o quão longe estamos de poder emular os processos da natureza, mas nos incitam a tentar descobrir mais sobre os micro-organismos e seus processos, com todo respeito.

3.2 Os Agentes dos Processos Biológicos

Os organismos vivos, em diversas escalas e ambientes, por diferentes meios e em diferentes ritmos, realizam todos os processos biológicos. Eles são os agentes de todos os processos biológicos da terra. Eles incluem os organismos multicelulares, grandes e pequenos, assim como os unicelulares, de minúsculas dimensões.

Desde suas origens, há três ou quatro bilhões de anos, a vida na terra se desenvolveu até os dias atuais, em que é estimada uma diversidade de algo como 8,7 milhões de espécies para os organismos eucariontes, ou seja, aqueles relativamente mais desenvolvidos, com núcleos nas células (NATURE, 2011), e algo como dez milhões de tipos de bactérias e Archaea, ou seja os procariontes (MICROBES ORG, 2012), apesar de que as estimativas de diversos estudiosos variam bastante, em até mais de uma ordem de magnitude.

Os três domínios dos micro-organismos da árvore da vida, segundo a moderna classificação filogenética, são as bactérias e Archaea (difícil precisar a ordem em que surgiram), e os eucariontes (que também incluem os demais organismos), surgidos posteriormente. É importante compreender como os micro-organismos dominam esmagadoramente a vida na terra, pelo menos do ponto de vista de quantidade absoluta de organismos e sua massa total. Apesar do reconhecimento que algumas estimativas anteriores podem ter substancialmente superestimado a população microbiana, devido à sua baixa concentração em muitos ambientes deficientes em nutrientes, estima-se que, excluindo as plantas terrestres, entre 30% e mais de 50% do total da massa de seres vivos no mundo seja de micro-organismos, dependendo dos autores que realizaram essas estimativas (KALLMEYER et al., 2012; WHITMAN, COLEMAN, WIEBE, 1998). E até 95% deles estão no solo ou subsolo, portanto sua importância para a indústria do petróleo não deve ser menosprezada. Além disso, os micro-organismos realizam mais de 99% dos mais importantes ciclos biogeoquímicos de nutrientes e outros compostos

(carbono, nitrogênio, enxofre, etc.) na biosfera (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2011).

Os primeiros organismos da terra tiveram que ser micro-organismos que se desenvolveram nas condições existentes àquela época, extremas, em relação às condições predominantes atuais. Dessa forma, está claro que jamais foi um desafio insuperável para a natureza preparar a vida de forma que pudesse sobreviver em condições de altas temperaturas, ausência de oxigênio, presença de compostos tóxicos, altos níveis de radiação, etc., justamente condições comuns durante muito tempo após o nascer da vida na terra. Os micro-organismos que dominaram o mundo durante as primeiras centenas de milhões de anos, ou até os primeiros bilhões de anos, modificaram a terra profundamente, gerando rochas, atmosfera e ambientes totalmente diferentes daqueles em que iniciaram sua evolução.

Mas no registro genético, preservado de alguma forma na biodiversidade atual, é muito provável que muitas das qualidades que permitiram a sobrevivência em ambientes extremos ainda estejam presentes no conjunto genético da biodiversidade atual, mesmo que não de forma dominante e atuante. Pelo menos podemos imaginar que se essas qualidades foram desenvolvidas no passado, nada impede que a natureza volte a desenvolver qualidades semelhantes, e possivelmente com mais facilidade, com base na biblioteca genética já desenvolvida até o momento. Um fator que pode impedir essa possibilidade, ou dificultar esse processo, é a extinção de organismos chave, que ocorre constantemente e mais aceleradamente após a chegada do homem. O desaparecimento de organismos que poderiam ser os únicos herdeiros de determinadas informações genéticas representa a volta à estaca zero, necessitando um novo ciclo evolutivo para desenvolver as mesmas informações genéticas que codificam qualidades novamente desejáveis.

Em relação aos recursos petrolíferos e outros recursos minerais energéticos, assim como nas instalações para sua produção, os ambientes são propícios apenas à presença de micro-organismos, e não há espaço para organismos superiores. Há exceções em relação aos hidratos de gás e alguns outros recursos, em que organismos maiores podem atuar com impacto significativo (JONES, 2009b). Numa visão de MEOR, em que as modificações que o homem busca realizar para obter benefícios nos processos de produção de petróleo e outros recursos energéticos são

processos biológicos, eles só podem ser realizados por micro-organismos, numa escala microscópica, operante nos reservatórios petrolíferos.

3.2.1 Os Extremófilos

Os extremófilos, ou micro-organismos extremofílicos, são micro-organismos, de qualquer tipo, que vivem em ambientes extremos. Normalmente seria difícil imaginar que comunidades microbianas pudessem viver e se desenvolver em alguns desses ambientes. Mas essa visão é puramente antropocêntrica, pois na perspectiva de muitos dos procariontes (ou mesmo de alguns eucariontes, como fungos e outros), o ambiente em que o homem vive seria inviável ou até fatal. Para muitos, o oxigênio na atmosfera é intolerável, por exemplo. Mas nosso conhecimento filogênico sobre esses organismos está aumentando constantemente. A lista dos extremófilos conhecidos inclui organismos capazes de se desenvolver em praticamente todo tipo de ambiente, inclusive alguns que realmente desafiam nossa imaginação sobre os processos que permitem sua sobrevivência. Entre eles estão (CARLETON COLLEGE, 2012):

- Acidófilos – com melhor desenvolvimento em ambientes ácidos (pH baixo, entre 1 e 5);
- Alcalifílos – com melhor desenvolvimento em ambientes com pH elevado;
- Anaeróbios – se desenvolvem na ausência de oxigênio;
- Anaeróbios facultativos – se desenvolvem na presença ou ausência de oxigênio;
- Anaeróbios estritos – somente podem se desenvolver na ausência de oxigênio;
- Endolitos – se desenvolvem dentro de rochas, em poros ou entre grãos de minerais;
- Halófilos – se desenvolvem em altas concentrações salinas;
- Metanogênicos – produzem metano a partir de reações com hidrogênio e CO₂ (membros de Archaea);

- Oligotróficos – se desenvolvem em baixos níveis de nutrientes;
- Piezófilos (ou Barófilos) – se desenvolvem em elevadas pressões hidrostáticas;
- Psicrófilos – apresentam desenvolvimento ideal em temperaturas abaixo de 15°C;
- Termófilos – apresentam desenvolvimento ideal em temperaturas acima de 40°C;
- Hipertermófilos - apresentam desenvolvimento ideal em temperaturas acima de 80°C;
- Toxítolerantes – resistem a elevados níveis de compostos geralmente tidos como tóxicos, como benzeno, elementos radioativos, etc.;
- Xerófilos – se desenvolvem em ambientes de baixa umidade (pouca água livre);

Sob pressões incríveis, ou em águas escaldantes, extremófilos têm sido encontrados nos ambientes mais esdrúxulos da terra. No deserto de Atacama, entre a Argentina e o Chile, com temperaturas que variam de 56°C para -10°C do dia para a noite, praticamente sem água livre, com exposição extrema de radiação UV, micro-organismos desenvolveram a capacidade de metabolizar as baixas concentrações atmosféricas de monóxido de carbono e sulfeto de dimetila, em vez de realizar a fotossíntese, para conseguir sobreviver (LYNCH et al., 2012). Nas fontes hidrotermais da Tailândia, em temperaturas de 50°C a 57°C, em água saturada com compostos tóxicos, micro-organismos termofílicos fototróficos se desenvolvem em resistentes camadas de biofilmes sobre as rochas, apresentando atividades biológicas diferenciadas entre as diversas comunidades de cianobactérias e outros micro-organismos (PORTILLO et al., 2009). Abaixo do gelo da Antártida, assim como em lagos hiperssalinos e alcalinos, como Mono Lake, na Califórnia, podem ser encontradas comunidades de *Surirella*, por exemplo (CARLETON COLLEGE, 2012).

3.3 Biomímica

A biomímica (*biomimicry*) está baseada no princípio que a natureza tem aprendido a fazer o que funciona, o que é apropriado e o que é sustentável. Através do processo de evolução, os organismos vivos aprenderam a voar, a ocupar todo o espaço possível no mundo, manter condições adequadas de vida, construir estruturas incrivelmente complexas, e solucionar muitos dos problemas que afligem os seres vivos. A natureza desenvolveu materiais biodegradáveis fantásticos. Temos exemplos como o chifre do rinoceronte, que apesar de não ser um elemento vivo, pode se regenerar durante a vida do animal, e degradar-se após; a cola dos mexilhões, que funciona debaixo d'água; sedas de teias de aranhas que são mais fortes que o mais resistente material que o homem produziu artificialmente; complexos ninhos de cupins que mantêm a temperatura interna em confortáveis níveis mesmo quando as temperaturas externas variam de 40°C durante o dia a um frio congelante durante a noite; e patas de lagartixas que conseguem aderir a superfícies lisas, mesmo quando estão de cabeça para baixo (IUCS, 2008; BYTES OF SCIENCE, 2005).

Dessa forma, o conceito da biomímica sugere que a natureza já forneceu muitas soluções para os problemas enfrentados pelo homem, mas que apenas aguardam que ele descubra quais são essas soluções, como funcionam, e como poderá adaptar e aplicar essas soluções da melhor forma, para que atendam aos seus propósitos em determinadas condições. Um desses exemplos de condições que apresentam desafios operacionais são as diversas atividades da indústria do petróleo, em que problemas direta ou indiretamente limitam a produção de hidrocarbonetos devido a situações naturais ou criadas pelas intervenções produtivas. É bem provável que certos processos já existentes na natureza poderiam ser utilizados para superar ou mitigar essas limitações, bastando encontrar e saber aplicar essas soluções. Frequentemente, essas soluções envolvem processos microbiológicos que poderiam ser estimulados ou mesmo iniciados onde não ocorriam anteriormente.

As técnicas de MEOR representam o reconhecimento de que a biomímica fornece importantes lições para o homem na sua busca por tornar mais eficiente o aproveitamento dos recursos energéticos (hidrocarbonetos) existentes *in situ*. A

natureza dispõe de um acúmulo de aprendizado muito vasto, adquirido através de processos evolutivos operantes por milhões e até centenas de milhões de anos.

3.4 Ferramentas da Microbiologia

3.4.1 Ferramentas de Cultura, Isolamento e Identificação

Depois do microscópio, a cultura de micro-organismos tem sido a principal ferramenta de estudo dos micro-organismos. Para o estudo de micro-organismos, células cultivadas têm várias vantagens sobre aquelas que se encontram livres na natureza. Experimentos podem ser realizados com mais facilidade e controle sobre as condições de estudo. Ao sujeitar culturas a diferentes condições, também podem ser observados os efeitos de diferentes ambientes e as respectivas respostas dos micro-organismos. As culturas em laboratório geralmente podem facilmente ser iniciadas a partir de apenas uma célula, pelo processo de clonagem, resultando em um conjunto homogêneo de clones, que podem ser distinguidos entre si, quando apresentam diferenças genéticas (LODISH et al., 2000).

Infelizmente, somente uma pequena fração (muito menos de 1%) dos micro-organismos pode ser cultivada em laboratório, apesar de que os métodos de cultura têm avançado na direção de permitir cultivar cada vez mais desses micro-organismos. A análise do RNA (*ribonucleic acid*, na sigla em inglês, de uso comum, ou ácido ribonucleico – ARN, na sigla em português), de ribossomos de muitos organismos estudados sugere que micro-organismos que não podem ser cultivados em laboratório estão representados em praticamente todos os grupos de procariontes, e várias divisões não têm nenhum micro-organismo que seja cultivável (KAEBERLEIN, LEWIS, EPSTEIN, 2002). Dessa forma, uma vasta maioria dos micro-organismos continua sem ser identificada e classificada pelas técnicas convencionais de cultura (MICROBES ORG, 2012). Essa limitação também impediu que importantes processos biológicos fossem entendidos, pois os micro-organismos que realizam esses processos não puderam ser conhecidos.

Para compreender a dificuldade de estudar alguns processos biológicos realizados por determinados micro-organismos, basta entender que muitos desses micro-organismos não podem ser cultivados em laboratório, sob condições normais ou conhecidas. Algumas colônias de micro-organismos somente se desenvolvem na presença de seus simbioses, o que explica grande parte da impossibilidade de cultivar determinados micro-organismos isoladamente. Da mesma forma, muitos processos biológicos, assim como seus agentes microbiológicos, tampouco ocorrem isoladamente, necessitando, portanto, um estudo mais amplo das comunidades que vivem sinergicamente no meio ambiente em que esses processos ocorrem. A sinergia que existe na natureza entre diversas comunidades, não somente entre diversos tipos de micro-organismos, dificulta imensamente o estudo de muitos micro-organismos de grande interesse científico, e especialmente de interesse para MEOR. Eles não podem ser estudados de forma isolada, sob condições rígidas de controle no laboratório. O estudo desses micro-organismos e seus processos exigiu novas abordagens, onde os micro-organismos que se deseja estudar são cultivados juntamente com outros com os quais convivem na natureza, emulando mais fielmente sua ocorrência e atividade normal. Dessa forma, pelo menos alguns micro-organismos tidos como não cultiváveis puderam ser cultivados e observados, e seus processos biológicos puderam ser mais bem entendidos (KAEBERLEIN, LEWIS, EPSTEIN, 2002).

O isolamento dos micro-organismos coletados para estudo, a partir de misturas muito complexas encontradas nos solos e outros ambientes de onde são coletados, é um grande desafio para seu estudo. Esse isolamento é essencial para poder realizar uma identificação positiva e a caracterização do micro-organismo que se deseja estudar. Tradicionalmente, diversos métodos têm sido utilizados para isolar micro-organismos e realizar sua cultura, mas o método mais comum, barato e simples é a cultura em meio nutritivo de amplo espectro, método desenvolvido por Robert Koch em 1881. O meio de cultura fornece os nutrientes básicos necessários para o desenvolvimento da maioria dos micro-organismos estudados, como uma fonte de carbono, nitrogênio, fósforo, sais minerais, etc., em uma base hidratada (fonte de água e meio aquoso). Posteriormente, os equipamentos utilizados foram aprimorados, e o meio de cultura passou a ser à base de agar, derivado de algas, ou produtos semelhantes. Com esse método simples, em muitos casos, a sucessiva

cultura e separação permite um eventual isolamento específico de um tipo individual de micro-organismo que se deseja estudar.

Outros métodos de isolamento envolvem a diluição ou enriquecimento seletivo do meio de cultura, o uso de meios de cultura impregnados com compostos que respondem a determinados processos realizados pelos micro-organismos estudados, o uso de meios de cultura seletivos para determinados micro-organismos, o uso de antibióticos específicos nos meios de cultura, e inúmeras outras variações (LABORATORY NEWS, 2012). Hoje, uma grande variedade de meios de cultura foi desenvolvida para permitir maior facilidade e especificidade na identificação de determinados micro-organismos (DSMZ, 2012).

É possível, no entanto, estudar os micro-organismos que são difíceis de cultivar, através de novas técnicas genéticas e através de outros avanços tecnológicos. Quando as condições de crescimento não são conhecidas, ou quando muito poucos indivíduos são estudados isoladamente, é mais difícil isolar micro-organismos para estudo. Pinças óticas que funcionam com lasers foram desenvolvidas para manuseio individual de células ou micro-organismos, e mais recentemente, a miniaturização permitiu o desenvolvimento de ferramentas microscópicas para a micromanipulação de micro-organismos, que permitem que apenas um indivíduo seja manipulado, isolado dos demais existentes em um meio de cultura, e posteriormente cultivado separadamente ou analisado com outras técnicas, como PCR (*polymerase chain reaction* – reação em cadeia da polimerase, ou assistida por polimerase), inclusive realizado individualmente em um único indivíduo (FRÖHLICH, KÖNIG, KAHLE, 2003).

A identificação de diferentes tipos de micro-organismos é geralmente feita de forma simples, mas nem sempre totalmente específica, observando as propriedades (cor, formato, etc.) do crescimento das colônias cultivadas nos meios de cultura utilizados. A observação com microscópios pode fornecer informações para uma identificação mais precisa, através das características morfológicas. Adicionalmente, a técnica de Gram é utilizada para diferenciar micro-organismos, sujeitando-os a compostos químicos que geram uma coloração diferente, de acordo com o tipo de parede celular, permitindo diferenciar tipos fundamentais de micro-organismos.

Uma identificação mais precisa de um micro-organismo estudado, uma vez isolado, pode ser obtida com testes bioquímicos, que permitem determinar sua resposta comportamental ou metabólica, a diferentes agentes químicos. A

dificuldade de chegar a uma identificação precisa reside no fato que é necessário saber de antemão quais testes são mais indicados para obter respostas que diferenciem efetivamente o micro-organismo estudado, dentre os possíveis tipos em que poderia ser classificado. Esses testes também podem exigir muitas repetições sequenciais e combinações específicas, até poder chegar a uma identificação definitiva.

Os métodos fenotípicos (observação do conjunto das características de um micro-organismo, ou seu fenótipo) têm evoluído ao ponto de poderem ser realizadas com processos automatizados, em equipamentos especiais, como os dos padrões API e MicroScan, dos principais fornecedores desses equipamentos, API (Analytical Products Inc.) e American Hospital Supply Corp., respectivamente (KIRSCHNER et al., 2001).

3.4.2 Ferramentas Genéticas

Os métodos genotípicos estudam todo o conjunto genético de um organismo, ou seja, seu genótipo, para estabelecer sua identificação precisa, pois essa informação é única para cada tipo (cepa) de micro-organismo. Os métodos genotípicos atualmente disponíveis funcionam através do sequenciamento do DNA (*deoxyribonucleic acid*, na sigla em inglês, de uso comum, ou ácido desoxirribonucleico - ADN, na sigla em português) do organismo estudado. Isso se deve ao fato de que dos ácidos nucleicos (RNA e DNA), é o DNA que codifica todas as instruções genéticas que determinam as características únicas de cada tipo de organismo, enquanto o RNA realiza a síntese das proteínas que o DNA codifica, e executa as demais instruções contidas no DNA, como a expressão de genes, etc. Existem diversas técnicas para sequenciar partes do DNA. O DNA desses micro-organismos é primeiramente isolado, e depois sequenciado em equipamentos específicos, permitindo uma identificação e diferenciação precisa em relação a outros tipos semelhantes (CRACRAFT et al., 2012).

As primeiras técnicas de sequenciamento utilizavam a cromatografia para separar o DNA, ou pedaços de DNA, em partes menores, como os genes. O sequenciamento é realizado amostras de DNA, que podem sofrer quebras durante

seu manuseio. As cores observadas diferenciavam as sequências genéticas. Posteriormente, avanços tecnológicos trouxeram os métodos baseados na análise das terminações das cadeias de DNA, métodos de modificação química e clivagem seletiva do DNA, e de volta aos métodos de análise de terminações de DNA, mas com melhor desempenho. Muitos outros métodos foram desenvolvidos, mas novas técnicas geraram os métodos de sequenciamento de alta velocidade, amplificação *in-vitro* de material clonado, sequenciamento paralelo, sequenciamento por ligações, e métodos baseados na espectrometria de massa (DNA SEQUENCING COM, 2012).

3.4.2.1 Sequenciamento 16S rRNA

No caso de micro-organismos, a sequência 16S de nucleotídeos do gene que codifica o RNA de ribossomos é, hoje, um padrão de fato, para a identificação de tipos de micro-organismos. Este método é conhecido como método de sequenciamento 16S rRNA, seguindo a nomenclatura em inglês. Comparações de sequências de diferentes micro-organismos indicam o quanto um é diferente de outro, e a relação temporal de sua origem evolutiva comum (LINDQUIST, 2012). O sequenciamento 16S rRNA é feito por diversos equipamentos que podem ser facilmente encontrados em laboratórios de genética, como o MicroSeq 500 da Perkin-Elmer, juntamente com o analisador dos resultados produzidos, o sequenciador Genetic ABI PRISM 310, também da Perkin-Elmer (KIRSCHNER et al., 2001)

O gene 16S rRNA é um componente da pequena subunidade 30S dos ribossomos dos procariontes. Esse gene codifica uma rRNA, e essa rRNA, por sua vez, compõe o RNA dos ribossomos do micro-organismo. Como toda informação genética, ele é compacto; está composto de 1542 nucleotídeos, o que o torna relativamente fácil e barato para sequenciar. Os genes que o codificam são conhecidos como 16S rRNA e são utilizados na reconstrução filogenética dos micro-organismos estudados. Como os micro-organismos apresentam grande dificuldade de classificação por métodos convencionais, e como o rRNA está presente em praticamente todos os micro-organismos, ele é ideal para identificar e diferenciar o

DNA de micro-organismos procariontes, dentre um conjunto de DNA que pode conter o de outros organismos, como plantas, etc. Os ribossomos se apresentam como muito preservados através de diferentes tipos de micro-organismos (poucas mudanças evolutivas), pois sua função é fundamental, na tradução de mRNA em proteínas essenciais para funções vitais. Mas as variações aleatórias que ocorrem frequentemente fornecem uma forma de distinguir e estabelecer probabilidades de micro-organismos estudados serem de diferentes tipos. Diversas sequências de rRNA podem existir em um único micro-organismo (GREEN GENES, 2012).

A sequência do rRNA é evolutivamente conservada em relação a outras sequências de genes dentro de uma mesma espécie, apesar de não ser possível desenhar uma sonda para identificar grandes domínios taxonômicos como filos, classes ou ordens (NEVES e GUEDES, 2012). Dada a conservação do rRNA em diferentes tipos de micro-organismos, foram calculadas margens de erro de 19% e 8% no caso de sequências com semelhanças 16S rRNA de 90% e 98%, respectivamente. Isso implica que apesar de boa especificidade, é possível que o método 16S rRNA forneça resultados inconsistentes ou errados, no caso de cepas de tipos muito próximos, em relação a outros métodos mais definitivos, como a hibridização DNA-DNA (JANDA e ABBOTT, 2007).

Também existem outros problemas e limitações com as técnicas atualmente disponíveis. Mesmo com uma técnica tão eficaz na avaliação da estrutura da comunidade microbiana de um determinado compartimento ambiental, ela depende da técnica de PCR gerar uma quantidade suficiente de material a ser analisado. Infelizmente, a técnica de PCR pode subestimar a presença de tipos de cepas com baixa representatividade em uma comunidade microbiana, pois sua eficácia de amplificação não é linear em relação a diferentes abundâncias relativas de tipos de micro-organismos. Dessa forma, pode ser necessário realizar um grande número de sequências para poder observar certos tipos de micro-organismos, denominados táxons (ou taxa) da biosfera incomum ("*rare biosphere taxa*"), se elas forem relativamente raras na comunidade microbiana sendo estudada (GONZALEZ et al., 2012.).

3.4.2.2 Hibridização DNA-DNA

Devido ao fato que certas características das bactérias, como a competitividade em determinados ambientes, os substratos utilizáveis, e os metabólitos produzidos variam em nível inferior ao de espécie (cepa), para segregar esses micro-organismos com identificação mais exata, há necessidade de um método que forneça resultados de identificação mais específicos. A hibridização DNA-DNA permite que essa diferenciação seja atingida com mais resolução do que a da técnica de sequenciamento 16S rRNA.

A hibridização DNA-DNA é o método mais definitivo de identificar novas cepas nas unidades taxonômicas apropriadas, mas tem suas próprias dificuldades, associadas ao manuseio complexo, à necessidade de hibridização em pares completos, ao uso de isótopos, e à dificuldade de criar um banco genético central. Dessa forma, os métodos que utilizam sequências curtas para a identificação são preferidos (CHO e TIEDJE, 2001).

Quanto aos preparativos para que amostras de DNA de micro-organismos possam ser submetidas a análises, é necessário obter uma quantidade suficiente de material para estudo. Mas novas técnicas de hibridização DNA-DNA permitem que semelhanças entre sequências genômicas DNA-DNA (curtas) sejam comparadas, em vez de utilizar sequências longas. O que permitiu esse avanço foi a tecnologia de microarranjos, que mede os níveis de expressão de muitos transcritos simultaneamente, de forma automatizada, por leitores a laser robotizados. Os sistemas de leitura robotizados analisam milhares de pontos em uma pequena superfície (microarranjo) tratada quimicamente, onde amostras dos fragmentos são depositadas, hibridizadas, reagem com a superfície, e são observadas (contadas automaticamente) devido a marcadores fluorescentes inseridos nas amostras (OH et al., 2010).

A grande capacidade da técnica de hibridização DNA-DNA usando microarranjos e sistemas de leitores automatizados permitiu, inclusive, o sequenciamento em larga escala da genômica funcional de diversos organismos, inclusive o do homem, de forma rápida e barata. Dessa forma, é possível obter uma resolução que permite identificar micro-organismos que se apresentam como quase perfeitamente semelhantes, por outros métodos, mesmo em casos de níveis de

semelhança, entre micro-organismos observados, de até 97,5% (CHO e TIEDJE, 2001).

3.4.2.3 PCR (*polymerase chain reaction* - reação em cadeia assistida por polimerase)

Em praticamente todos os métodos de análise de DNA, a técnica de PCR é utilizada para obter quantidades suficientes de DNA, mesmo quando a amostra inicial é composta apenas por minúsculas quantidades de material genético original. A técnica de PCR, desenvolvida na década de 1980, permite replicar DNA a partir de uma amostra inicial, mas que deve ser pura.

Uma bactéria encontrada nos gêiseres do Yellowstone National Park, nos EUA, a *Thermus aquaticus*, forneceu a enzima DNA Taq polimerase, com elevada termoestabilidade, que hoje sustenta o funcionamento de praticamente todos os processos de PCR em milhares de laboratórios de genética no mundo inteiro. Esta descoberta é um exemplo de como achados inesperados em ambientes extremos, podem trazer enormes benefícios para a humanidade. A *T. aquaticus* revolucionou a indústria diagnóstica na medicina e em outras aplicações (ambiental, alimentícia, forense, etc.). Da mesma forma, é possível que novos micro-organismos a serem encontrados em outros ambientes extremos, esdrúxulos, também tragam grandes inovações ao mundo científico, com aplicações práticas valiosas para o mundo da biotecnologia (CRACRAFT et al., 2012).

Na técnica de PCR, a polimerase de DNA copia trechos de DNA a partir de um modelo do trecho original e dos nucleotídeos fornecidos no meio aquoso em que se desenvolve a técnica. Os nucleotídeos são os compostos (grupos de açúcares, fosfatos e compostos nitrogenados) que fornecem os elementos construtivos para formar novas cadeias de DNA. Os trechos originais e copiados se tornam os modelos (idênticos) que servem para duplicar mais DNA, gerando, assim, uma reação em cadeia, cuja evolução exponencial facilmente amplia a amostra original em milhões de vezes. O processo utiliza dezenas de ciclos de aquecimento e resfriamento em temperaturas específicas, para realizar sucessivas duplicações e separações do DNA em metades individuais da dupla hélice, que são

complementadas com nucleotídeos para formar mais DNA (MURNAGHAN, 2010). Cada ciclo, portanto, envolve a desnaturação do DNA original (separação em duas metades separadas) em altas temperaturas; anelamento dos *primers* (iniciadores que flanqueiam a região alvo); extensão ou alongamento pela enzima Taq polimerase (reconstrução de nova DNA semelhante à original) em temperaturas normais. Como os ciclos envolvem grandes variações de temperatura, a termoestabilidade da enzima Taq polimerase é fundamental para o processo (CUNHA et al., 2008).

A PCR facilitou a detecção rápida e sensível de micro-organismos, independentemente de serem ou não cultiváveis, mas ela não fornece informações sobre sua distribuição espacial em conjuntos microbianos (NEVES e GUEDES, 2012).

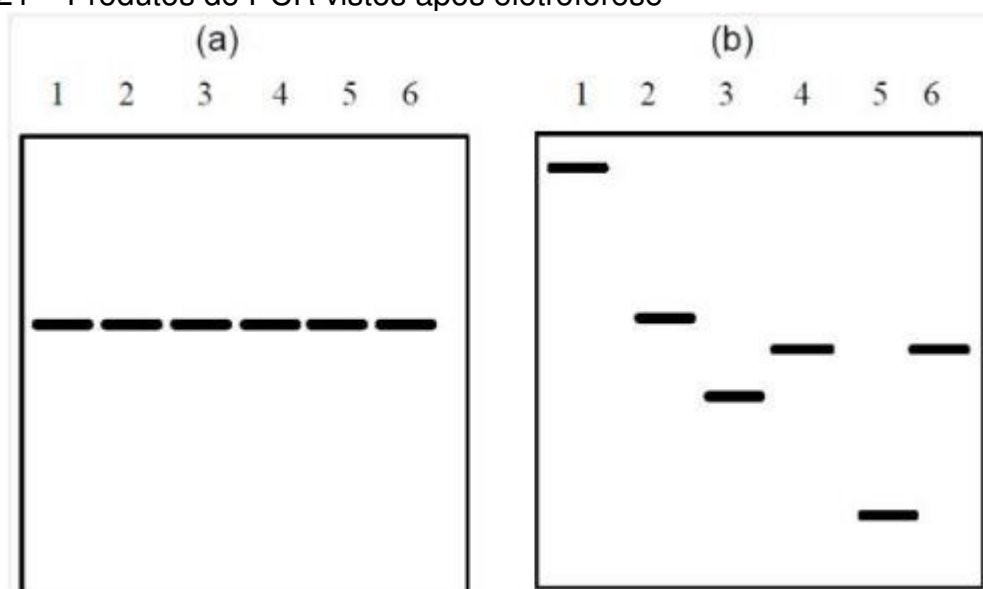
Também é importante entender que em alguns casos, o fenótipo de um micro-organismo não é totalmente definido por seu genótipo, pois condicionantes ambientais podem causar diferenças significativas, em nível individual, assim como em nível de colônia. Nesse caso, a identificação precisa de um micro-organismo é bem mais difícil, pois diferentes fenótipos podem estar associados a um mesmo genótipo. Adicionalmente, a identificação de um micro-organismo através da observação das características da colônia da qual faz parte pode ser praticamente impossível, pois um mesmo tipo de micro-organismo pode se desenvolver em colônias de características muito diferentes, dependendo de certas condições ambientais.

3.4.2.4 DGGE (*denaturing gradient gel electrophoresis* – eletroforese em gel com gradiente de desnaturantes)

Nesta técnica, o DNA de micro-organismos é extraído, é realizada a PCR nesse material, são obtidos os nucleotídeos 16S rRNA, e esse material é colocado em placas onde ocorre a eletroforese diferenciada dos diferentes fragmentos. Esta técnica permite identificar fragmentos (produtos de PCR) com o mesmo tamanho, mas diferentes sequências de DNA. Assim, fragmentos de diferentes organismos podem ser distinguidos. Na DGGE, a eletroforese dos produtos de PCR é realizada

em géis de poliacrilamida contendo um gradiente crescente de agentes desnaturantes, geralmente ureia e formamida. A mobilidade eletroforética diferenciada entre fragmentos de DNA do mesmo tamanho, mas de diferentes sequências, permite que estes sejam separados segundo sua movimentação no substrato. A desnaturação que ocorre ao longo do substrato gera perfis de mobilidade diferentes para as diferentes sequências, e os produtos de PCR podem ser visualizados em diferentes posições no gel com gradiente de desnaturantes (Figura 21). No gel sem desnaturantes, essa separação ao longo do gel não ocorre, impossibilitando a distinção entre diferentes produtos (MUYZER, 1999; CUNHA et al., 2008).

Figura 21 – Produtos de PCR vistos após eletroforese



Legenda: Produtos de PCR vistos após eletroforese em gel de agarose (a); e em gel com gradiente de desnaturantes (b).

Nota: A maior separação das diferentes moléculas, com DGGE, permite detectar melhor as variações nas sequências dos produtos.

Fonte: CUNHA et al., 2008.

Da mesma forma, uma separação de produtos de PCR pode ser realizada em gel com gradiente de temperatura (TGGE – *temperature gradient gel electrophoresis*, ou eletroforese em gel com gradiente de temperatura), pois diferentes temperaturas promovem uma diferente movimentação dos fragmentos, que assim chegam a diferentes posições no gel.

3.4.2.5 FAME (*Fatty Acid Methyl Ester Analysis* - análise de ácidos graxos)

Esta técnica não depende de cultura, mas descreve a composição das comunidades microbianas com base em seus agrupamentos de ácidos graxos. O perfil dos ácidos graxos microbianos é diferente para cada espécie microbiana, o que permite uma identificação mais exata do que outros métodos. Nesta técnica, os ácidos graxos são extraídos diretamente das amostras, através da saponificação, para liberar os lipídeos celulares; são então submetidos à metilação, que forma os ésteres metilados dos ácidos graxos microbianos; estes são processados para análise, e finalmente são analisados por cromatografia gasosa. A técnica de FAME tem sido mais utilizada em aplicações farmacêuticas e médicas, e permitiu gerar uma grande base de dados de perfis de ácidos graxos microbianos correspondentes à biblioteca de micro-organismos. Atualmente, as bibliotecas do MIDI Sherlock® Microbial Identification System contêm milhares de espécies catalogadas, descritas através de seus perfis microbianos de ácidos graxos (KUNITSKY, OSTERHOUT, SASSER, 2013).

3.4.2.6 FISH (Fluorescent in situ Hybridization – hibridização fluorescente in situ)

A técnica de hibridização fluorescente *in situ* (FISH) permite que genes específicos sejam mapeados em um determinado genoma, e não precisa ser realizada em células ativas. Ela também permite que células com determinados trechos de DNA possam ser identificadas em um conjunto de muitas células diferentes, ou que determinados micro-organismos sejam identificados em um conjunto microbiano com muitas cepas diferentes.

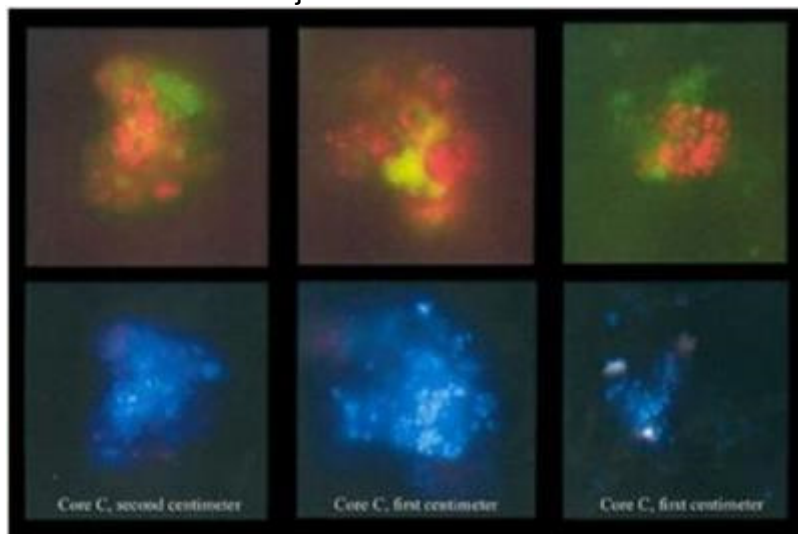
Essa técnica depende do preparo de pequenas sequências de material genético complementar ao trecho de DNA de uma célula ou micro-organismo que se deseja identificar em algum conjunto. Essas sequências são chamadas de sondas. As sondas de oligonucleotídeos usadas na técnica de FISH são marcadas (hibridizadas) com marcadores fluorescentes (fluorocromos) em diversas cores. Os fluorocromos mais comuns são verde, vermelho, laranja e infravermelho. Quando as

sondas contendo os fluorocromos se acoplam ao DNA de uma célula, se diz que elas se anelam ao DNA das células, e estas ficam visíveis quando visualizadas em microscopia fluorescente (NEVES e GUEDES, 2012).

As sondas FISH geralmente têm como alvo o RNA ribossomal, pois todas as células têm ribossomos para a tradução, e em grande quantidade, o que facilita a visualização quando marcados. Além disso, a sequência do rRNA é evolutivamente conservada em relação a outras sequências de genes dentro de uma mesma espécie, apesar de não ser possível desenhar uma sonda para identificar grandes domínios taxonômicos como filos, classes ou ordens (NEVES e GUEDES, 2012).

Sondas FISH de diferentes cores podem ser usadas ao mesmo tempo, para atingir diferentes alvos simultaneamente. Juntamente com a técnica de coloração de células com DAPI (4',6-diamidino-2-fenilindole), cuja fluorescência é azul sob luz UV, é possível visualizar, num amplo conjunto microbiano, diferentes cepas e sua representatividade em relação ao conjunto total. Isto porque o DAPI resulta em uma coloração não específica do DNA, pois se anela fortemente com regiões comuns do DNA, enquanto as sondas FISH permitem visualizar cepas específicas. Um exemplo desse efeito pode ser visto na Figura 22, onde cada conjunto total de microorganismos, na parte inferior, aparece em azul, pois foi marcado com DAPI, que não é específico. Logo acima, podem ser vistos os diferentes conjuntos de microorganismos que compõem o conjunto total, especificamente marcados com sondas FISH em vermelho (archaea) e verde (bactéria), e vistos sob microscopia fluorescente com filtros apropriados (RICE, 2013).

Figura 22 – Ilustração do método de visualização FISH de diferentes micro-organismos em três conjuntos microbianos



Legenda: Para cada conjunto (pares verticais), em azul o DAPI revela o conjunto inteiro, pois é não específico. Com filtros para vermelho (archaea) e verde (bactéria), a representatividade e distribuição de micro-organismos específicos desses reinos pode ser vista, pois sondas FISH marcaram cada um.

Fonte: RICE, 2013.

Ha três tipos diferentes de sondas FISH, com diferentes finalidades: sondas específicas para um local no cromossomo, para determinar em qual cromossomo se encontra um determinado gene, e identificar organismos que contêm esses cromossomos; sondas para sequências repetidas em cromossomos (sondas centroméricas), para determinar o número de cromossomos, ou se falta material genético em um cromossomo de um indivíduo, o que é especialmente importante na medicina; e sondas para cromossomos inteiros, sendo conjuntos de sondas menores, que podem conter diferentes misturas de fluorocromos, e servem para marcar cada cromossomo individualmente e gerar uma visualização espectral completa de um cromossomo (NIH, 2011).

3.4.2.7 Detecção de ATP

Nas operações de perfuração ou produção no campo, é importante poder monitorar quais populações de micro-organismos estão presentes nas formações encontradas, e ter uma ideia quantitativa de sua contagem absoluta e relativa.

Muitas dessas populações microbianas representam riscos às instalações e à saúde dos operadores, pois na presença de compostos *in situ* ou introduzidos (até inadvertidamente) pelas próprias intervenções (perfuração), elas podem resultar na produção de gás sulfídrico. Esse gás pode comprometer a integridade de peças metálicas (através da rápida corrosão causada), e é um grande perigo para os operadores que tiverem contato com esse gás.

Mas é impossível manter laboratórios microbiológicos completos em instalações que frequentemente estão isoladas e distantes de uma infraestrutura adequada. Em alguns casos, essas operações exigem monitoramento praticamente *real time*, ou seja, os resultados imediatos poderiam ser utilizados para a tomada de decisões, como medidas para mitigação de riscos ou outras formas de controle e prevenção. Uma das necessidades de monitoramento nessas condições é poder realizar uma identificação e contagem dos micro-organismos nas formações encontradas. Como as técnicas para identificação e contagem geralmente têm se baseado em métodos de cultura, que não fornecem resultados de forma rápida, as dificuldades de realizar um monitoramento microbiológico adequado resultou na busca por alternativas práticas a esses métodos.

A ATP (adenosina trifosfato) é a molécula que todas as células utilizam para o fornecimento de energia, incluindo para o transporte, metabolismo, produção de proteínas, divisão, etc. Assumindo que diferentes micro-organismos possuam quantidades semelhantes de ATP em suas células, uma contagem da quantidade de ATP presente em um meio com uma população microbiana pode fornecer uma indicação indireta, porém relativamente confiável, dos números absolutos de indivíduos microbianos presentes. Essa quantificação pode ser realizada facilmente e de forma muito rápida.

Porém, havia dificuldades referentes à grande influência da composição química do meio sobre a quantificação de ATP, nos métodos de quantificação de primeira geração. Somente com o advento de novas técnicas de mensuração foi possível relacionar a quantidade de ATP com a contagem de micro-organismos, de forma rápida e confiável. A segunda geração das técnicas de detecção de ATP incluem formas de quimicamente testar o tipo de meio em que a detecção é realizada, o que é feito praticamente de forma imediata. Assim, hoje é possível obter, em tempo real, uma contagem confiável do número de micro-organismos em condições de campo, em praticamente qualquer tipo de fluido, como emulsões

óleo/água, água produzida, água de formação, lamas de perfuração, etc. (KEASLER, 2012). Testando individualmente os fluidos provenientes de diferentes regiões, essas técnicas também permitem identificar exatamente em quais formações se encontram as populações microbianas que podem representar uma fonte de gás sulfídrico. Dessa forma, os tratamentos adequados podem ser focados somente nos fluidos dessas formações, tornando viáveis as medidas de controle dos micro-organismos problemáticos, enquanto geralmente é impraticável tratar a totalidade dos fluidos de um poço ou um campo produtor, se o problema se restringe a uma ou poucas regiões e volumes de fluidos.

3.4.3 Metagenômica

O objetivo dos estudos microbiológicos é descobrir e caracterizar micro-organismos em um conjunto natural, visando sua utilização em processos dirigidos pelo homem. Investigar o potencial genético de uma comunidade microbiana permite conhecer suas potencialidades. Entretanto, historicamente, esse trabalho tem sido realizado através do cultivo de linhagens e sua caracterização com testes nutricionais, bioquímicos e fisiológicos, o que limita a possibilidade de uma ampla avaliação taxonômica e filogenética, e de um conhecimento da real biodiversidade microbiana de um ambiente (GOMES et al., 2009). Os métodos de investigação de micro-organismos de um ambiente, independentes da cultura, permitem ampliar o conhecimento sobre seu potencial e quais processos microbiológicos estão envolvidos. Geralmente o estudo dessas potencialidades é feito através de uma investigação de seus metabólitos - os compostos produzidos durante seu desenvolvimento, e essa investigação, por sua vez, envolve o estudo de sua expressão gênica. O conjunto dessas técnicas é hoje conhecido como a metagenômica.

Esse novo campo das ciências biológicas, surgido há poucos anos, oferece uma nova e poderosa ferramenta para estudar o mundo microbiano e ajudar a entender sua diversidade, ocorrência e competências. Essas competências são os processos codificados pelas informações genéticas de suas diversas populações existentes em um determinado compartimento ambiental, e representam o mais

valioso aspecto do conhecimento sobre uma determinada biota. Na metagenômica, as ferramentas de sequenciamento genético utilizadas para analisar todo o DNA de um organismo são aplicadas em um conjunto de micro-organismos, ou seja, em uma comunidade cuja composição sequer é completamente conhecida. Quando se estuda o DNA de um micro-organismo, o processo é individual, e somente o DNA de um único tipo de cepa microbiana é analisado, geralmente proveniente até de um único indivíduo, mas multiplicado (com PCR) para permitir um estudo detalhado. Mas a metagenômica quebrou esse paradigma, permitindo analisar toda uma biota de uma vez, sem ter que isolar ou cultivar cepas individuais (THE NATIONAL ACADEMIES, 2012).

Essa nova possibilidade de realizar análises em massa simplificou e barateou imensamente o estudo de comunidades microbianas, ao mesmo tempo em que amplia o conhecimento amplo sobre a biota de um determinado compartimento ambiental, como áreas impactadas por derramamentos de petróleo, por exemplo, onde se deseja conhecer não somente um micro-organismo que por acaso esteja adaptado a essas condições, mas toda a biota local, que pode conter muitos mais exemplos do que seria possível coletar e cultivar individualmente. Como as técnicas genéticas convencionais dependem de poder isolar e cultivar micro-organismos que somente então podem ser estudados, a esmagadora maioria dos organismos presentes em praticamente qualquer ambiente ficou de fora desses estudos, pois não se desenvolvem nos meios de cultura utilizados.

Conseqüentemente, não é possível selecionar micro-organismos que reflitam o pleno potencial da biota original apenas com meios de cultura. Por isso, estudiosos vêm sugerindo a técnica da metagenômica, onde todo o conjunto da biota de um ambiente amostrado é coletado, para avaliar o maior número possível de diferentes micro-organismos que poderiam ser eficazes no processo desejado, mesmo se alguns não são passíveis de cultura individual no laboratório. (TYSON e BANFIELD, 2005). Essa abordagem, chamada de independente de cultura, hoje já é bastante aceita em diversos processos que dependem de micro-organismos retirados do meio ambiente, como na biorremediação (ZRAFI-NOUIRA et al., 2012). A necessidade de trabalhar com culturas individuais de micro-organismos representa uma limitação que a metagenômica elimina em muitos casos.

A realidade sobre a vasta maioria de micro-organismos que não podem ser cultivados surgiu a partir de análises de genes 16S rRNA, em amostras retiradas

diretamente do meio ambiente comum, como solos, em vez de amostras isoladas, que sugeriram que muitas novas linhagens existiam, mas que não podiam ser isoladas por técnicas convencionais. Desde então, o foco das investigações genômicas passou a ser uma abordagem ampla, visando o conhecimento de um ambiente e sua biota como um todo, uma visão mais holística e menos restrita, também chamada de “*shotgun genomics*” (genômica de pistola, ou espingarda, em alusão ao seu amplo objetivo e alcance, em relação ao das ferramentas genéticas convencionais). A partir daí, muitos novos genes e seus produtos foram descobertos, como num abrir de comportas, que em vez de permitir um ínfimo fluxo de conhecimento, de repente permitiu a descoberta de vastos conjuntos de genes que jamais haviam sido vistos. Os avanços das biociências incluíram novas proteínas, enzimas, e muitos outros produtos de importância medicinal, ambiental e industrial (HANDELSMAN, 2004).

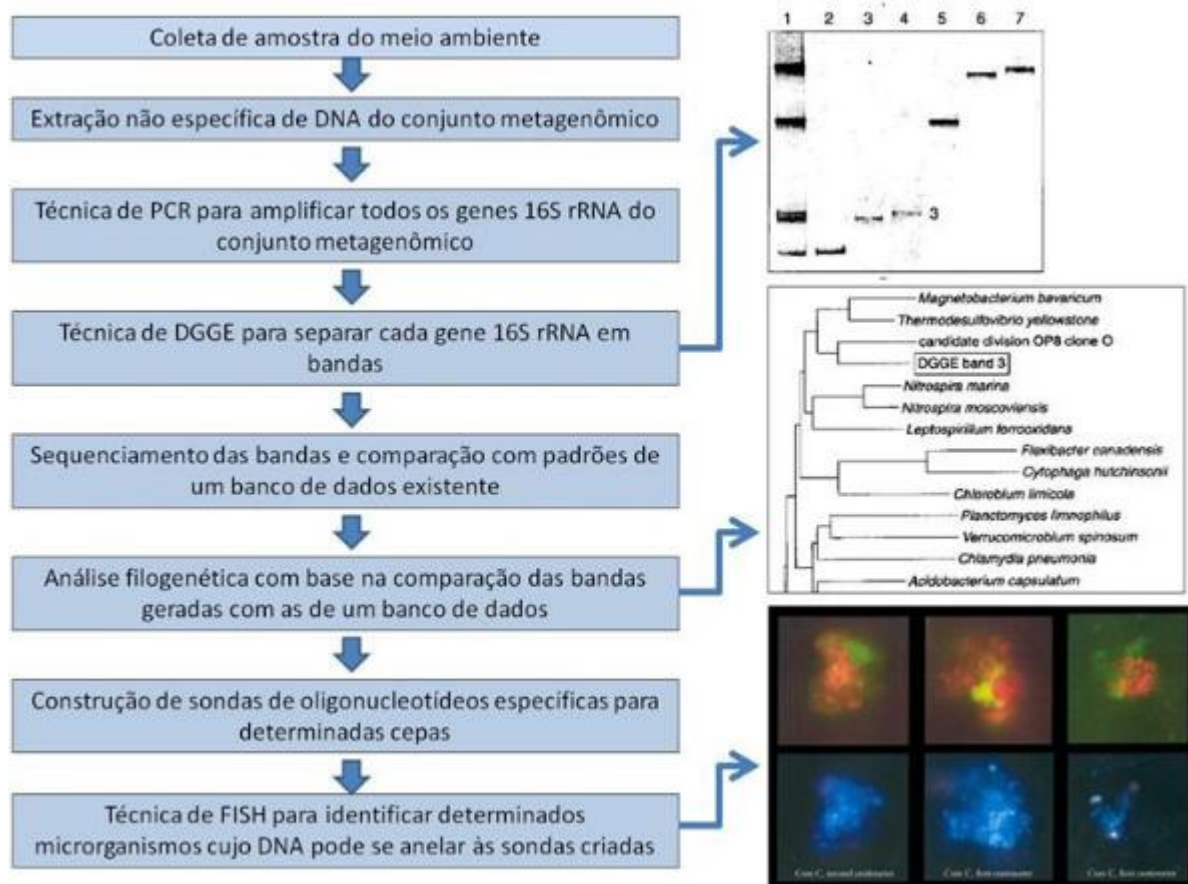
A dificuldade de selecionar micro-organismos desejáveis a partir do conjunto amostrado é ainda maior porque a maioria daqueles que podem ser cultivados representam apenas os micro-organismos que se desenvolvem bem em condições de abundância de nutrientes, como nos meios de cultura geralmente utilizados, e não necessariamente aqueles que exercem funções desejáveis. Com a metagenômica é possível analisar o material genético do conjunto amostrado, em vez de analisar apenas o material de micro-organismos em uma cultura.

O estudo metagenômico de um determinado local se inicia tomando uma amostra desse ambiente, como de solo, água, ou de partes de organismos vivos que abrigam comunidades microbiológicas. O DNA de todos os micro-organismos encontrados é extraído junto, e sujeito a estudos com equipamentos sequenciadores, que revelam os diversos genes existentes entre todos esses micro-organismos. Os estudos podem focar o levantamento de todo o material genético obtido dessa forma, para identificar determinadas partes (genes) que compõem essa biota, sem, no entanto, saber exatamente a quais micro-organismos cada um desses genes pertence. Alternativamente, dentre esses genes encontrados, podem ser observados genes conhecidos, que codificam determinadas proteínas ou processos em outros organismos individuais estudados, e dessa forma pode se comprovar que determinadas funções fazem parte de algum tipo de micro-organismo ali existente, mesmo se por outros meios ele não puder ser isolado ou cultivado (THE NATIONAL ACADEMIES, 2012).

Dessa forma, há duas abordagens, ou técnicas metagenômicas, para analisar um conjunto metagenômico: uma baseada em análise das sequências genômicas presentes, e outra baseada na análise das funções realizadas por um conjunto microbiano. A primeira utiliza a semelhança de sequências observadas no conjunto amostrado, em relação a sequências de bibliotecas genômicas conhecidas. A segunda utiliza uma análise genética para identificar os micro-organismos predominantes de um determinado processo biológico realizado pelo conjunto microbiano (ZRAFI-NOUIRA et al., 2012).

Com a primeira abordagem seria possível, por exemplo, observar a presença de marcadores para determinadas proteínas ou processos em um determinado conjunto metagenômico, mesmo se eles estiverem presentes em micro-organismos que não podem ser cultivados em laboratório. Nesse caso, o DNA seria extraído da amostra ambiental, a técnica de PCR seria utilizada para amplificar os genes 16S rRNA sequenciados dos micro-organismos presentes, e a técnica de DGGE (ou TGGE) seria usada para separar os diferentes produtos gerados pela técnica de PCR, que representam os diferentes micro-organismos presentes na amostra ambiental. Uma comparação das bandas resultantes da técnica DGGE com a de bancos de dados poderia, então, sugerir uma associação filogenética que permitisse identificar boa parte dos micro-organismos presentes na amostra ambiental, sem realizar a cultura dos mesmos. Seria possível, ainda, utilizar a informação extraída sobre as sequências associadas a determinados micro-organismos para gerar sondas de oligonucleotídeos específicos para determinadas cepas, com a técnica de FISH (MUYZER, 1999). Esse procedimento poderia ser descrito como na Figura 23.

Figura 23 – Sequência de passos para a análise e seleção de determinados micro-organismos



Nota: A sequência descreve os passos para a análise e seleção de determinados micro-organismos, a partir de uma coleta metagenômica e técnicas de manipulação genéticas, sem necessidade de realizar uma cultura da cepa desejada.

Fonte: O autor, adaptado de MUYZER, 1999.

A segunda abordagem é mais útil para identificar quais dos muitos micro-organismos presentes em um conjunto metagenômico são os principais agentes de determinados processos biológicos.

Com a primeira técnica, uma vez determinado que no conjunto metagenômico há um ou mais micro-organismos com capacidade de realizar determinado processo desejável, teoricamente não seria necessário selecionar e identificar esse(s) micro-organismo(s). Bastaria utilizar o conjunto para realizar o processo, como o desejado em uma técnica de MEOR, por exemplo. Na prática, os conjuntos metagenômicos não são diretamente utilizados, mas servem para fornecer os conjuntos microbianos que de fato serão utilizados em técnicas de MEOR ou outros processos. Dessa forma, após realizar estudos metagenômicos, micro-organismos sabidamente presentes, cuja presença foi indicada por esses estudos, podem ser objeto de diversas técnicas de cultura que levem à sua seleção individual, ou de outras

técnicas genéticas. Claro, ainda é possível que determinadas cepas alvo não possam ser individualmente cultivadas, mesmo se sua presença for confirmada por técnicas metagenômicas.

Uma importante etapa da busca por soluções biológicas para problemas da engenharia foi facilitada pela metagenômica. A busca continua sendo pelos códigos genéticos pertinentes para um determinado processo desejado, que codificam a produção de produtos específicos, como proteínas, enzimas, etc. Mas agora essa busca é independentemente de poder ou não cultivar cepas específicas de micro-organismos, que antes reduzia muito o universo de possíveis candidatos com qualidades desejáveis. A metagenômica fornece um mapa completo dos códigos efetivos, enquanto a microbiologia convencional busca meios de cultivar o maior número possível de diferentes colônias a partir de cepas presentes que podem ser cultivadas.

Ainda será necessário descobrir como realizar amostragens com técnicas que maximizem a coleta de material genético de toda uma população de diferentes micro-organismos, e como tornar essa amostra o mais representativa possível dos diferentes tipos de micro-organismos (cepas) existentes em um local. Ao aprimorar as técnicas de extração de material genético, será mais fácil evitar contaminação e assegurar o máximo de representatividade. Mas a metagenômica já permite estudar as informações genéticas de uma população inteira, para sugerir quais os diversos processos que estão representados, e entender como essa biota interage com seu ambiente. Esse esforço investigativo agora pode ter como base uma comunidade com muitos (milhares) de tipos de micro-organismos, enquanto antes era restrito a um esforço individual, repetitivo.

Mesmo não fornecendo uma resposta específica em relação à identificação de cada um desses micro-organismos, ou quais deles codificam quais processos, a metagenômica fornece uma relação completa das competências da biota local. A partir daí fica mais fácil imaginar que se algum composto específico está entre os compostos codificados geneticamente, por exemplo, será possível encontrar o micro-organismo que realiza tal feito, além de buscar entender o significado e possível aplicação desse processo, pois a natureza não se dedica a produzir produtos complexos, que exigem esforço microbiano, à toa.

O futuro da genômica está assegurado, devido ao seu potencial de fornecer uma grande quantidade de informações genéticas sobre comunidades inteiras,

enquanto nosso conhecimento microbiológico sobre os ambientes que nos rodeiam ainda é tão escasso. Especialmente importante para o desenvolvimento das técnicas de MEOR, as investigações metagenômicas atualmente focam o levantamento genômico de áreas impactadas por derramamentos de óleo, e outras em que o petróleo faz parte do ambiente, como reservatórios e afloramentos de rochas que contêm hidrocarbonetos, como possível fonte de uma base de conhecimento sobre os diferentes tipos de micro-organismos que podem ter alguma atuação em relação ao petróleo. Esses estudos visam constatar, a partir das evidências dos genes apontadas pela metagenômica, novos micro-organismos e genes que codificam funções específicas de interesse para MEOR, para o meio ambiente e para a indústria do petróleo. Alguns objetivos dessas pesquisas são (BLAHA, 2009):

- Micro-organismos alcanotróficos;
- Comunidades de micro-organismos sinérgicos, em ambientes petrolizados;
- Micro-organismos redutores de metais;
- Procariontes redutores de sulfato;
- Micro-organismos produtores de biossurfatantes;
- Micro-organismos produtores de biopolímeros;
- Micro-organismos metanogênicos;
- Genes codificantes de atividade sobre n-alcanos.

Os resultados de alguns desses esforços são uma importante esperança para desenvolver novas ferramentas de MEOR, pois até o momento é muito limitado o número de micro-organismos e processos biológicos conhecidos, que perfazem o rol das técnicas disponíveis.

3.4.4 Bibliotecas da Genética

Uma importante ferramenta da microbiologia é uma base de dados contendo informações genéticas sobre o conjunto de micro-organismos conhecidos. Essas bases de dados estão se expandindo exponencialmente, à medida que novas cepas

são identificadas e seu material genético é sequenciado e depositado nesses bancos de dados. As novas técnicas de sequenciamento têm barateado o custo de realizar o sequenciamento de novos organismos, inclusive de organismos superiores, com informações genéticas mais complexas. Essas informações ficam à disposição dos próximos pesquisadores que estudam esses micro-organismos ou outros semelhantes, facilitando seus trabalhos. Infelizmente, muitos bancos de dados não são públicos, pois reconhecem que suas informações são valiosas, e não devem ser disponibilizadas livremente. De fato, muitos cobram pelo acesso às suas informações, e muitos sequer informam que dispõem de tais dados.

A empresa GenBank, por exemplo, em 2011 já tinha arquivados em seus bancos de dados informações sobre mais de 100.000 espécies, e hoje já não é impossível imaginar que algum dia haverá, nos bancos genéticos do mundo, informações sobre praticamente todos os organismos conhecidos. Contudo, é importante entender que não somente as informações genéticas compõem o conhecimento sobre os organismos e micro-organismos. Dados não genéticos, como citomorfologia, comportamento, característica bioquímicas e fisiológicas também são fundamentais para entender completamente espécies individuais, e também têm sido juntadas e compiladas por muitos bancos de dados. O cruzamento dessas informações com as informações genéticas permite prever e possivelmente criar novas combinações genéticas que deem origem a organismos criados sob medida para alcançar determinados objetivos da engenharia genética. Mas ainda estamos longe disso, e para tanto nossas bases de dados terão que crescer muito e a integração dessas informações terá que ser muito mais aprimorada (CRACRAFT et al., 2012).

O grau do nosso desconhecimento em relação à biota de ambientes tão comuns como o solo sobre o qual vivemos pode ser mais bem entendida ao ver que os organismos, e especialmente os micro-organismos, desse compartimento ambiental são pouquíssimo conhecidos. A maioria dos ecossistemas na Terra está na escuridão, sob águas profundas, sob a superfície da terra, ou em outros ambientes aonde a luz do sol não chega. Em relação a estes habitats, conhecemos pouco sobre seus verdadeiros tamanhos e extensão em área e profundidade; sobre a quantidade e diversidade de organismos que vivem neles; sobre suas funções, interações e importância ambiental e biogeoquímica no mundo; ou sobre sua possível capacidade para realizar processos úteis ao homem em outras situações.

Estes ambientes são conhecidos como a biosfera profunda, e têm revelado conter surpreendentes tipos de organismos e comunidades microbianas, à medida que novas incursões investigativas estudam esses locais e sua vida (EDWARDS, BECKER e COLWELL, 2012).

Ainda assim, a perspectiva dos benefícios que podem advir de um melhor e mais completo conhecimento das informações genéticas contidas apenas nos diferentes tipos de micro-organismos da microbiota deste planeta que estão acessíveis aos pesquisadores, resultou num ambicioso projeto para catalogar tais informações, o que representaria mais de 35 trilhões de pares de bases de DNA, ou seja, superior a dez mil vezes as informações do sequenciamento do genoma humano (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2011).

3.5 Processos Biológicos em MEOR

3.5.1 Histórico

Processos biológicos naturais têm sido adaptados e utilizados comercialmente, e tradicionalmente são utilizados em aplicações que permeiam toda a sociedade moderna, desde milênios até a atualidade. A produção de alimentos tem utilizado os processos biológicos há milhares de anos, na fabricação de queijo, iogurte, vinagre, vinho, cerveja, e outros. A produção industrial de álcool, papel, resinas e outros, assim como a valoração dos resíduos da agroindústria, utilizam processos biológicos copiados da natureza. Na área de saneamento, os cuidados com o tratamento dos dejetos das residências, desde meados do século XIX, vêm aplicando processos biológicos para dar destino adequado aos esgotos domésticos em fossas. Antes disso, fossas e sumidouros simples já faziam parte de orientações rotineiras na China e em outras culturas. No século XX, a partir dos anos sessenta, nos EUA, disseminou-se o uso de aditivos biológicos em estações de tratamento de efluentes (SEGHEZZO et al., 1998). Mesmo com pouca compreensão científica, há muito tempo, o funcionamento de estações de tratamento de efluentes (ETEs) era iniciado e mantido através da adição de esterco (fonte de complexa mistura de

micro-organismos que degradam a matéria orgânica), assim como de outras fontes de aditivos biológicos naturais, para manter seus processos biológicos ativos. No agronegócio, a pressão para alcançar maiores produtividades levou ao uso de probióticos, produtos com ingredientes biológicos ativos, na alimentação de animais, desde a década de 1970. Técnicas que empregam aditivos biológicos (bioaugmentação) para melhorar a produtividade e alcançar a sustentabilidade da carcinicultura no Brasil também foram propostas, inclusive como solução para alguns dos grandes problemas e desafios enfrentados por essa indústria (JONES e DOURADO, 2003; CHAVES, JONES, DOURADO, 2006). Mais recentemente, toda uma nova indústria tem surgido em torno de aplicações de bio-lixiviação para produção de metais preciosos e urânio.

Muitos destes processos representam apenas um refinamento ou modificação de processos naturais encontrados na natureza, para obter maior produção ou produtos mais específicos. A indústria farmacêutica está, cada vez mais, voltada para a fabricação através de processos microbianos especificamente desenvolvidos para esses fins. Porém, diferentemente das outras aplicações da biotecnologia, a indústria farmacêutica tem enfatizado o desenvolvimento de técnicas transgênicas para alcançar seus objetivos.

A recuperação do petróleo existente em novos espaços identificados no mesmo campo, através da perfuração direcional ou de novos poços envolve investimentos substanciais. Técnicas de MEOR para estimular a produção *in situ*, em contrapartida, poderiam ser aplicadas em determinados poços e regiões produtoras, sem grandes investimentos e com custos relativamente baixos. Especialmente em relação a técnicas tradicionais, vantagens substanciais poderiam ser obtidas, pois muitas das técnicas tradicionais são intrinsecamente energeticamente intensivas e de alto custo, certamente abrindo espaço para que outras técnicas possam superar suas vantagens.

Na indústria do petróleo sempre houve um forte incentivo à busca por novas tecnologias para ampliar ou estender a produção de petróleo de áreas que enfrentam problemas de escoamento da produção. Portanto, ainda nos primeiros anos das experiências com MEOR, mesmo quando o uso de produtos biológicos e dos mecanismos operantes não eram bem compreendidos, testes com MEOR foram levados adiante. Mesmo em ambientes considerados desfavoráveis para processos

biológicos, como regiões polares, a biotecnologia obteve resultados altamente favoráveis (MCCARTHY et al., 2004).

Apesar da necessidade de entender e controlar melhor os processos envolvidos, os resultados demonstraram que é possível obter um aumento compensador da produção e do fator de recuperação do petróleo com técnicas de MEOR (DESOUKY et al., 1996; YAKIMOV et al., 1997; LI et al., 2002). Outras publicações relatam a reversão do declínio da produção (BROWN, VADIE, STEPHENS, 2002), o aumento da produção (BROWN, VADIE, STEPHENS, 2005), e outros sucessos. O DOE também divulgou experiências bem sucedidas utilizando técnicas de MEOR, inclusive com estimativas de custos e valores correspondentes à recuperação adicional de petróleo por conta do uso dessas técnicas (US DOE, 2005). Dessa forma, ficou claro que as técnicas de MEOR têm inquestionavelmente demonstrado seu potencial em diversas frentes, se bem que ainda não foi possível transformar esse potencial em desempenho garantido.

De lá para cá, muitos exemplos de aplicações de técnicas biológicas em MEOR foram estudadas por diversos autores, que buscaram fazer um apanhado das diversas iniciativas em MEOR, ao longo de seu progresso tecnológico (JONES, CHAVES, DOURADO, 2006). Essas técnicas de MEOR, envolvendo produtos bioquímicos ou o uso de micro-organismos, aumentam o leque de opções disponíveis para lidar com os problemas de produção de petróleo de um determinado poço, ou mesmo de um campo inteiro, seja essa redução ou limitação natural ou por conta de intervenções mal sucedidas.

A superação dos problemas e dos fatores limitantes encontrados nestas atividades, através da biotecnologia, é um exemplo da engenhosidade humana, desenvolvendo novas tecnologias a partir de processos biológicos básicos, amplamente difundidos na natureza. (JONES, CHAVES, DOURADO, 2006).

3.5.2 Bioestimulação versus Bioaugmentação

É necessário fazer uma separação entre as biotecnologias atualmente sendo desenvolvidas, que objetivam modificar a composição e atuação da biota de um determinado compartimento ambiental. Os objetivos podem ser os mais diversos,

mas a intenção é aproveitar processos biológicos naturais, que ocorrem na natureza, para obter resultados em aplicações que o homem desenvolveu. É difícil classificar as diversas técnicas da biotecnologia em uma ou outra classificação, devido à complexidade de seus métodos e ao seu uso em diferentes áreas. Mas uma diferenciação importante a ser feita é entre a biotecnologia que envolve a manipulação genética, a bioengenharia, e as demais técnicas focadas na transformação artificial dos processos biológicos, e a biotecnologia natural, que envolve a aplicação de processos e micro-organismos naturais, focada nas técnicas de seleção de micro-organismos adequados e no entendimento de como utilizar esses micro-organismos da melhor forma para maximizar o efeito e o desempenho desejado.

Ainda na biotecnologia natural, cabe diferenciar a bioestimulação da bioaugmentação (assim conhecida nos meios comerciais em que essa tecnologia é comercializada e utilizada, mas também conhecida como bioadição e bioaumento). A bioestimulação refere-se à adição de produtos químicos, não micro-organismos, para estimular processos biológicos, especialmente através da adição de nutrientes e fatores críticos identificados como úteis aos micro-organismos existentes que realizam um processo biológico desejado. Este termo também contempla medidas que visam modificar condições físicas que possam estimular a biota presente. A característica fundamental é a ausência de manipulação genética significativa.

A bioestimulação reconhece o valor dos processos biológicos levados a cabo por comunidades biológicas naturais, e coloca ênfase nos organismos que realizam estas tarefas, buscando otimizar seu próprio desempenho. Como conceito, a bioestimulação representa um avanço em relação à postura orgulhosa, em que o homem pretende fazer melhor do que a natureza, tentando desenvolver soluções próprias, inéditas, independentemente das que foram desenvolvidas pela natureza através de processos evolutivos, aprimorados durante bilhões de anos. Ainda assim, a bioestimulação esbarra na limitação do escopo de seu alcance, pois apenas considera a otimização do desempenho da biota existente naturalmente no local, não buscando diretamente complementar ou modificar essa biota artificialmente.

A bioaugmentação refere-se à adição de micro-organismos em si, seja de uma ou de mais cepas, e, frequentemente, em combinações que resultam em efeitos mais notáveis do que os promovidos por cepas individuais. A bioestimulação também pode fazer parte da bioaugmentação, pois diversos micronutrientes são

essenciais para complementar os nutrientes básicos e preencher as necessidades de nutrição de uma biota, de forma a permitir seu desenvolvimento saudável e pleno desempenho. Dessa forma, a bioaumentação não exclui a possibilidade da adição conjunta de produtos químicos, nutrientes e outros, conquanto o objetivo seja o de estabelecer determinados processos biológicos através da adição de populações de micro-organismos especificamente selecionados, modificando a população microbiana existente para promover os processos biológicos desejados. Como o foco é no resultado, ou seja, na otimização dos processos desejados, não apenas na biota existente, a abrangência do conceito da bioaumentação é maior.

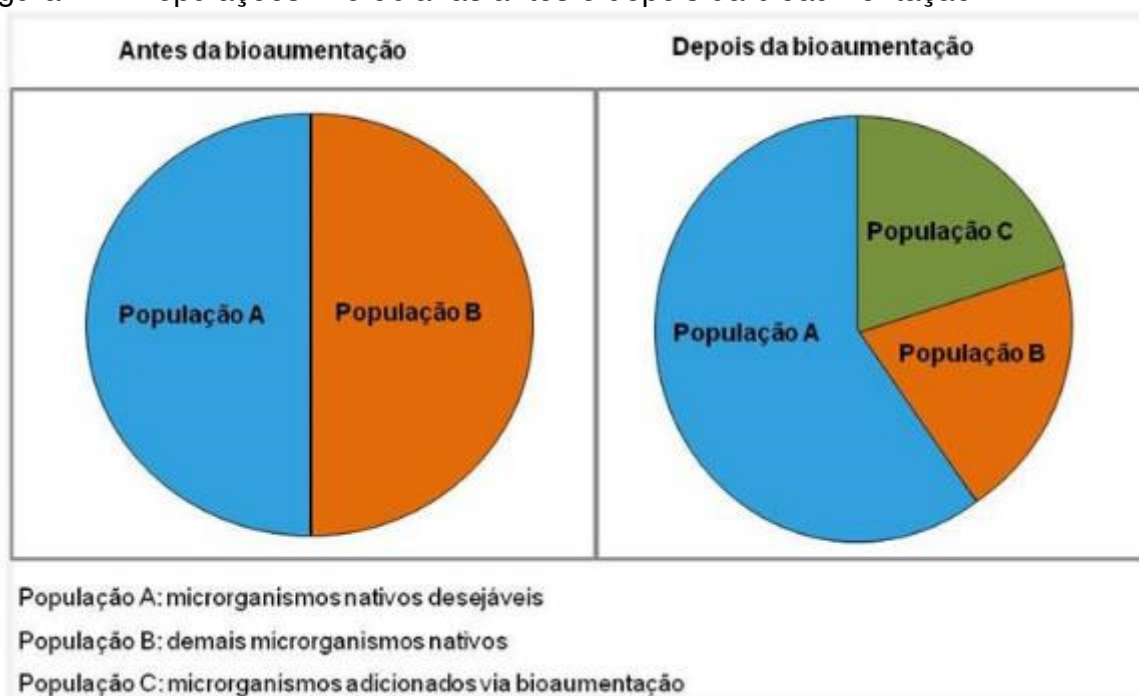
Dessa forma, considera-se a bioaumentação como a biotecnologia de ponta, e seria proveitoso empenhar esforços para seu aprimoramento e aplicação, como forma de alcançar os benefícios possíveis em diversas aplicações práticas. Dentre as aplicações onde a bioaumentação apresenta maior potencial está o tratamento de efluentes e a biorremediação de solos contaminados, mas cada vez mais, MEOR surge como importante foco de estudos e aplicações práticas da bioaumentação, assim como da bioestimulação (JONES, CHAVES, DOURADO, 2006; JONES e ANSELMO, 2007).

Hoje se tem uma compreensão básica, mas fundamental dos processos envolvidos na bioaumentação. A bioaumentação pode ocorrer em qualquer compartimento ambiental, como uma estação de tratamento de efluentes (ETE), ou um reservatório de hidrocarbonetos, por exemplo, onde uma biota poderia existir ou ser implantada. Antes da bioaumentação, a biota existente, se é que ela está presente, normalmente consiste de diversos tipos de micro-organismos, alguns mais eficazes do que outros, na realização dos processos desejados. Numa ETE, esses processos desejáveis são a degradação dos diversos compostos orgânicos presentes e a produção de uma biomassa sedimentável, passível de ser removida facilmente do efluente tratado. Num campo petrolífero, esses processos podem estar relacionados à redução da viscosidade do óleo, ou ao controle da população de determinados micro-organismos nocivos, ou a outro efeito que facilite a produção do óleo.

Esta situação é descrita classicamente na Figura 24, onde a população dos tipos de micro-organismos nativos desejáveis é indicada como População A; a população dos demais tipos de micro-organismos nativos é indicada como População B; e a população dos tipos de micro-organismos selecionados para

serem adicionados ao compartimento ambiental a ser tratado, por serem conhecidamente mais eficazes na realização dos processos desejados, é indicada como População C. O objetivo da bioaumentação é modificar a biota do compartimento ambiental em que se vai atuar, ampliando a fatia da População A, estabelecendo a fatia da População C, e minimizando a fatia da População B (JONES, 2006).

Figura 24 - Populações microbianas antes e depois da bioaumentação



Fonte: O autor.

Num determinado compartimento ambiental, a temperatura ambiente, a pressão, a salinidade, a presença de diversos compostos químicos relevantes, a concentração de nutrientes, e as condições de operação dos diferentes equipamentos existentes, assim como outros fatores, podem ser suficientes para afetar o desempenho de populações críticas para o resultado desejado da bioaumentação. Alguns fatores podem até ser imperceptíveis, por não serem objeto de monitoramento específico, ou podem parecer individualmente insignificantes, mas no complexo funcionamento interdependente das populações microbianas, eles podem causar grandes divergências no desempenho da bioaumentação (OCHIENG, ODIYO, MUTSAGO, 2002). Dessa forma, em relação à existência de populações de micro-organismos indesejáveis, como as BRS, que causam a corrosão de

equipamentos de produção, é comum observar que muitos campos petrolíferos nunca apresentam um *mix* ideal de populações microbianas, ou sequer um *mix* satisfatório, e operam sob forte influência dessas populações indesejáveis, sofrendo sérios prejuízos.

A biota é a chave de qualquer sistema biológico, e existe em um constante equilíbrio dinâmico, que pode variar bastante. Alguns micro-organismos estão morrendo e outros crescendo, fazendo com que as proporções populacionais de cada tipo variem, e diferentes tipos de micro-organismos se tornem atuantes ou dominantes. Não compreendemos totalmente como as condições favoráveis podem se estabelecer, nem como elas podem desaparecer tão facilmente, mas não é difícil imaginar como inúmeros fatores, dificilmente conhecidos ou controlados, possam influenciar o desempenho final de uma população de um determinado compartimento ambiental.

Uma crença intuitiva que tem dificultado a assimilação das tecnologias relacionadas à bioaugmentação é que a inoculação de micro-organismos em um determinado compartimento ambiental, por exemplo, deveria ser eficaz mesmo se for realizada uma só vez, e não continuamente. Mas a bioaugmentação precisa ocorrer continuamente para manter o *mix* populacional ideal desejado da biota do compartimento ambiental, que busca retornar às condições originais de equilíbrio entre as populações de sua biota. Na prática, portanto, o efeito da bioaugmentação geralmente não perdura após uma única inoculação, e dessa forma o próprio conceito básico que fundamenta a bioaugmentação tem sido questionado. Na realidade, o conceito da bioaugmentação não se baseia apenas no fato de introduzir novos micro-organismos no sistema de tratamento, mas em manter um novo equilíbrio no *mix* populacional da biota do compartimento ambiental tratado, através da adição constante e suficiente de populações desejadas, para superar as tendências contrárias, resultantes dos diferentes fatores que afetam seu equilíbrio. Esse conceito leva em conta que sempre há uma tendência contrária à modificação imposta pela bioaugmentação, que busca voltar ao equilíbrio anterior.

Assim, a bioaugmentação tem sido aplicada desde os anos 1960, mas devido à falta de compreensão dos mecanismos biológicos operantes nesta tecnologia, e devido à dificuldade de documentar os resultados adequadamente, ela tem sido considerada pouco científica, e seus resultados pouco confiáveis, com base na ausência de modelagens robustas de seus processos.

Além da corrida tecnológica para compreender e dominar os processos biológicos descobertos na natureza, e desenvolver soluções dirigidas por nosso conhecimento, usando sofisticadas tecnologias de manipulação genética e conhecimento de ponta em outras disciplinas, também se abriu o caminho para encontrar soluções prontas, disponíveis na natureza, que apenas precisam ser aplicadas na prática (GROMMEN e VERSTRAETE, 2002). Este é, fundamentalmente, o estado da arte da bioaugmentação, que se apresenta hoje como fonte de solução para os mais diversos problemas, inclusive com aplicação em MEOR.

3.5.2.1 Produtos Biológicos Disponíveis

Tipicamente, os produtos da indústria de aditivos biológicos consistem de várias cepas de micro-organismos, geralmente bactérias e fungos, além de outros componentes (aditivos químicos, micronutrientes, etc.), para potencializar sua eficácia. Estes micro-organismos são isolados de ambientes naturais, sem sofrer qualquer modificação genética, e selecionados de acordo com diversos critérios para acentuar características desejáveis, ou reduzir características indesejáveis. À medida que os principais bancos mundiais de cepas, como o American Type Culture Collection, dos EUA (ATCC, 2012); o CNCM, da França (INSTITUT PASTEUR, 2013); o NCCB, da Holanda (KNAW, 2013); o DSMZ, da Alemanha (LEIBNIZ INSTITUTE, 2013); o MTCC, da Índia (MTCC, 2013); ou o CCCD, do Brasil (CEFAR, 2008), e outros, se consagraram como fontes confiáveis de micro-organismos com características seguras e processos metabólicos conhecidos, os fornecedores passaram a utilizar, quase que exclusivamente, estas fontes confiáveis de cepas originais para seus produtos.

O conhecimento da biologia, microbiologia e química dos micro-organismos e de seus processos geralmente está disponível, através desses bancos, aos pesquisadores e técnicos que desenvolvem novos aditivos biológicos. Porém o conhecimento sobre as interações dos micro-organismos e seus processos, adquirido com muito trabalho e custo, no laboratório e no campo, forma a base da inteligência competitiva dos fabricantes concorrentes, e não é livremente

compartilhada, pois representa um fator crítico de vantagem competitiva entre eles. Os fornecedores fazem uso de diferentes critérios e combinações destas características, para formular seus produtos. Desta forma, a qualidade dos produtos disponíveis evoluiu, à medida que estudos em laboratórios, aliados a experiências de campo, resultaram em novos produtos com atuação específica, e outros aprimoramentos (PODELLA, RADICE, HAUPTMANN, 2004; QUESNEL e NAKHLA, 2005; QURESHI et al., 2005; VOGELAAR et al., 2002).

Hoje existem produtos disponíveis comercialmente, com capacidade de quebrar compostos orgânicos de difícil degradação, como fenóis, TCE, CFCs, HCFCs, e PAHs, em subprodutos menos complexos e mais facilmente metabolizados por outros tipos de micro-organismos, assim como produtos não tradicionais, com muito melhor eficiência na redução de amônia (nitrificação/desnitrificação), por exemplo (BOOPATHY e MELANCON, 2004).

Como resultado de aprimoramentos tecnológicos, os produtos biológicos melhoraram de qualidade por conta dos ingredientes não biológicos que os fabricantes utilizam, pois sem micronutrientes na quantidade, diversidade e características de assimilação adequadas, a biota não atingirá seu potencial de desempenho.

Finalmente, os aditivos biológicos também evoluíram em relação às técnicas de acondicionamento, concentração e conservação, tratadas como fatores importantes de vantagem competitiva entre fabricantes. Os produtos geralmente são fornecidos como micro-organismos liofilizados veiculados em farelo de grãos, ou em suspensões líquidas estabilizadas. Ambas as técnicas evoluíram bastante, e hoje existem produtos embalados em sacos plásticos solúveis, que potencializam seu desempenho e facilitam sua aplicação, assim como formas sólidas, que permitem um aproveitamento muito superior, em certas aplicações. As soluções líquidas, que podem ser preparadas a partir das formulações secas ou concentradas, também são fornecidas prontas e vêm apresentando melhor viabilidade dos micro-organismos, e validades mais longas dos seus componentes ativos. (JONES, 2006).

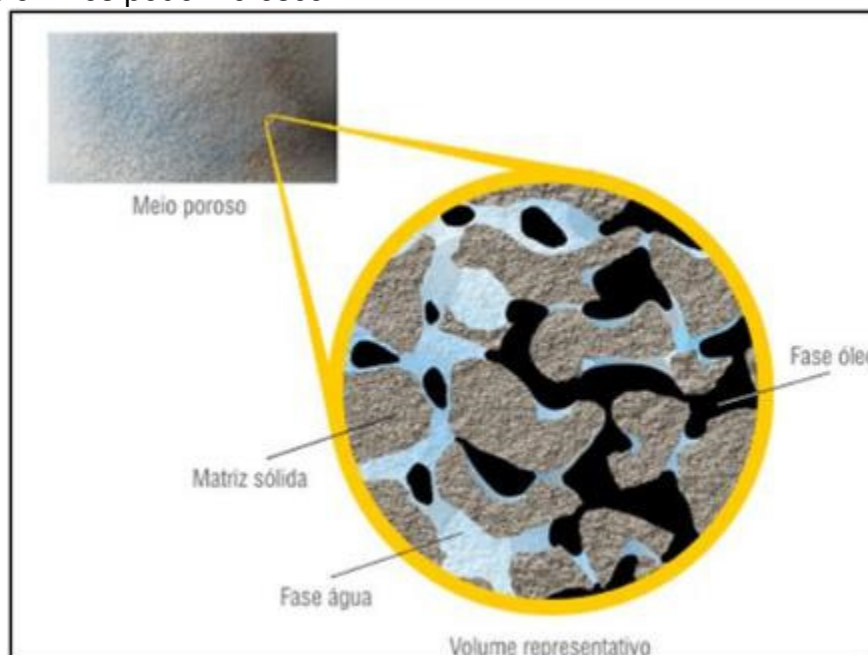
3.6 Microbiologia do Petróleo

Em relação à microbiologia do petróleo, a compreensão de seus mecanismos é ainda maior do que na microbiologia geral, pois a principal característica desta disciplina é que além de envolver os processos biológicos comuns à microbiologia, ela envolve a complexa relação entre a biota de um reservatório (todo o conjunto microbiano, nativo ou introduzido); o óleo desse reservatório; as diversas rochas desse reservatório; e as instalações introduzidas pelo homem, como tubulações e outros equipamentos. Esses fatores, que afetam uns aos outros, resultam em uma imensa complexidade para prever os resultados de qualquer ação individual, seja ela uma interferência humana intencional, ou uma consequência de alguma mudança natural no ambiente. É uma máxima da microbiologia que é praticamente impossível controlar isoladamente um ou outro processo biológico, ou a produção de apenas um determinado produto, sem afetar a produção de outros, ou modificar outras condições, e cada intervenção resulta em uma modificação dessas condições, o que torna difícil prever resultados com muita certeza. Na microbiologia do petróleo, portanto, vale buscar entender os processos atuantes, seus controles, e como realizar intervenções que maximizem os resultados desejados e minimizem os resultados indesejados, sem pretender poder controlar absolutamente todos os parâmetros envolvidos.

Um dos processos mais importantes para entender é justamente o crescimento de micro-organismos, nativos ou introduzidos, no ambiente do reservatório.

O crescimento de micro-organismos ocorre na fase água, pois ela é necessária à manutenção e ao desenvolvimento de todas as formas de vida conhecidas. Mas no interior das rochas dos reservatórios, esse crescimento pode ocorrer tanto na fase água, com as células dos micro-organismos se desenvolvendo de forma dispersa; assim como justamente na interface dessa fase com outra fase, como a interface água-óleo ou a interface água-rocha (UFSC, 2012; ABBASNEZHAD, 2010). Essas regiões de crescimento podem ser vistas na Figura 25, que representa uma visão microscópica de uma rocha, onde diversas fases coexistem (água, óleo, rocha), oferecendo oportunidade de crescimento na fase água e nas interfaces água-óleo e água-rocha.

Figura 25 – Ilustração das regiões onde micro-organismos individuais, bioflocos e biofilmes podem crescer

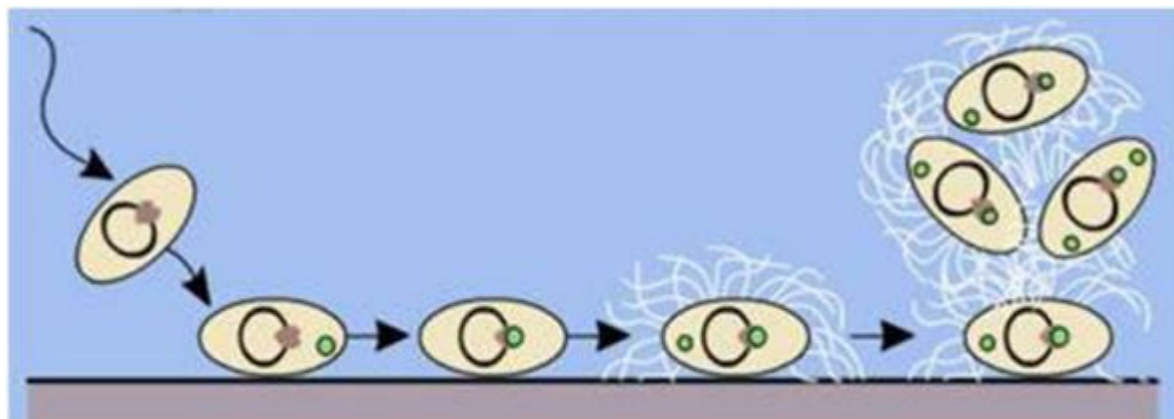


Legenda: São mostradas as regiões de crescimento na fase água, e nas interfaces que envolvem a água e o óleo ou a rocha.

Fonte: UFSC, 2012.

De fato, os micro-organismos comumente exibem propriedades de aderência a superfícies sólidas, onde suas células formam bioflocos, ou pequenos grupamentos mais ou menos amorfos; eventualmente esses bioflocos se tornam um biofilme, uma forma de colônia mais contínua e consistente (Figura 26). O crescimento de bioflocos e biofilmes envolve a produção de exopolímeros, ou exopolissacarídeos, que ligam as células umas às outras e à fase sólida. Os biofilmes resultam em uma resistência dos micro-organismos muito maior à abrasão e tração por fluidos se deslocando sobre o biofilme, e também muito mais resistente a outras formas de agressão à comunidade microbiana, como luz UV, agentes tóxicos, limpeza mecânica, etc. Esse crescimento é fundamental para a elevada resistência que diversos micro-organismos apresentam contra os melhores e mais fortes esforços para erradicar certas populações microbianas, como nas medidas de limpeza e desinfecção contra agentes infecciosos.

Figura 26 - Processo de formação de bioflocos, que eventualmente se transformam em biofilme



Nota: A produção de exopolímeros permite que os micro-organismos se fixem entre si e à fase sólida.
Fonte: ASK NATURE, 2012.

O crescimento de biofilmes pode resultar em um maior desempenho das comunidades microbianas envolvidas, em relação aos processos biológicos que os micro-organismos poderiam realizar na forma dispersa, pois os biofilmes concentram maior número de indivíduos e propiciam melhores condições de interagir com o meio e com as fases adjacentes (ABBASNEZHAD, 2010). Os biofilmes podem ser importantes nos processos que se deseja estimular, nas técnicas de MEOR, mas também podem apresentar problemas relacionados a sua resistência, como a dificuldade de desfazer essas formações, caso elas sejam indesejáveis.

4 MEOR – MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY

O autor vem compilando uma lista do extenso número de tipos de processos biológicos que são conhecidos e propagados como técnicas de MEOR. Muitas das técnicas de MEOR recentemente descritas ou propostas se enquadraram em uma ou outra classificação já existente abaixo, mas algumas exigiram a criação de novas categorias, pois o rápido desenvolvimento tecnológico de MEOR resultou em novos processos que não se enquadravam nas categorias existentes. É o caso da dissociação microbiana de hidratos de gás (JONES, 2009b), do uso de micro-organismos vivos como biomarcadores, e outras técnicas mais recentes e inovadoras. Da lista abaixo, algumas técnicas mais importantes são descritas em maior detalhe mais adiante.

- Biorremediação de áreas contaminadas com resíduos oleosos (*Bioremediation of oil contaminated sites*)
- Tratamento de resíduos da indústria do petróleo (*Biotreatment of oil industry wastes*)
- Produção microbiana de biopolímeros (*Microbial production of biopolymers ou microbial flow diversion – MFD, ou ainda permeability profile modification*)
- Produção microbiana de bioflocos (*Microbial floc production*)
- Exclusão biocompetitiva de BRS (*Biocompetitive exclusion of SRB*)
- Produção microbiana de biosurfatantes *in situ* (*Microbial production of biosurfactants in-situ*)
- Solubilização de óleos pesados (*Solubilization of heavy oils*)
- Transformação microbiana de parafinas (*Microbial transformation of paraffins*)
- Degradação seletiva de óleos pesados (*Selective biodegradation of heavy oils*)
- Dessulfurização microbiana de óleos e gás com alto teor de enxofre (*Microbial desulfurization of sour oil and gas*)
- Biorrefino ou biotransformação *in situ* (*Biorefining ou in situ molecular modification*)

- Emulsificação microbiana de óleo e água (*Microbial emulsification of oil and water*)
- Desemulsificação microbiana de óleo e água (*Microbial de-emulsification of oil and water*)
- Gaseificação de óleos em metano e outras frações leves (*Microbial gasification of oil into methane and other gas fractions*)
- Conversão microbiana de CO₂ em metano (*Microbial conversion of CO₂ into methane*)
- Marcadores microbianos, como os marcadores nanotecnológicos (*Microbial markers, as in nanotechnology markers*)
- Dissociação microbiana de hidratos de gás (*Microbial dissociation of gas hydrates*)
- Bioacidificação ou produção microbiana de CO₂ e ácidos orgânicos (*Microbial production of CO₂ and organic acids*)

4.1 Estado da Arte

4.1.1 Compilação de Estudos Prévios sobre Técnicas de MEOR

Dado o amplo histórico das técnicas de MEOR, os sucessos alcançados e seu potencial estratégico, hoje é interessante realizar levantamentos que possam estruturar essas experiências, de forma a facilitar a escolha e aplicação das técnicas de MEOR mais indicadas para casos específicos. As técnicas de EOR têm ainda mais tempo de uso e mais casos relatados na literatura do que as de MEOR, mas da mesma forma que foram realizados levantamentos que apresentam uma compilação histórica das experiências com EOR, como relatado no Capítulo 2, estudos que apresentam uma compilação das experiências com MEOR também têm sido realizados, visando o acompanhamento da aplicação dessas técnicas. Outros estudos publicados buscam oferecer métodos ou apontar estratégias para otimizar a escolha e aplicação das técnicas de MEOR.

4.1.1.1 Compêndios Publicados sobre as Técnicas de MEOR

Como parte da pesquisa bibliográfica realizada neste trabalho, algumas publicações foram organizadas na tabela seguinte, como referência sobre os levantamentos do histórico das aplicações e experiências com essas técnicas (Tabela 1).

Tabela 1 - Exemplos de compêndios publicados sobre técnicas de MEOR aplicadas

Título do Trabalho	Descrição	Referência
Microbial Enhanced Oil Recovery	Capítulo de livro sobre técnicas de EOR em geral, com levantamento histórico das experiências, vantagens, problemas, desafios e do potencial das técnicas de MEOR.	RASHEDI, YAZDIAN, NAGHIZADEH, 2012
BIT's 2nd Annual World Congress of Petromicrobiology	Congresso mundial sobre microbiologia do petróleo aplicada em técnicas de MEOR, que abordou a experiência acumulada em MEOR.	BIT LIFE SCIENCES INC., 2011
Microbial biotechnology for enhancing oil recovery: Current developments and future prospects	Revisão histórica do desenvolvimento de MEOR, suas técnicas e experiências no mundo.	AL SULAIMANI et al, 2011
Biotechnology in petroleum recovery: The microbial EOR	Uma revisão dos mecanismos empregados nas experiências com MEOR, e avaliação do progresso alcançado pelas diversas técnicas de MEOR.	RAMKRISHNA, S. 2008
Microbially Enhanced Oil Recovery Technologies. A Review of the Past, Present and Future	Amplio levantamento de experiências com técnicas de MEOR, com uma avaliação crítica de possíveis problemas metodológicos.	MAUDGALYA, KNAPP, McINERNEY, 2007
Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR)	O mais completo compêndio, até então, de experiências com técnicas de MEOR, incluindo descrição de processos e produtos relacionados às técnicas de MEOR.	LAZAR, PETRISOR, YEN, 2007
Analyzing Microbial Improved Oil Recovery Processes From Core Floods	Estudo das experiências com MEOR e dos respectivos mecanismos envolvidos, em relação às técnicas que visam modificar a tensão interfacial, molhabilidade, e permeabilidade.	KOWALEWSKI et al, 2005b
Revival of Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) Initiatives on UK Continental Shelf	Levantamento crítico das técnicas de MEOR utilizadas no UKCS, avaliação das barreiras enfrentadas, e do que ainda precisa ser feito para obter melhores resultados.	HUGHES, 2003
Evaluation of EOR methods for heavy-oil recovery in naturally fractured reservoirs	Levantamento das experiências com MEOR e dos parâmetros técnicos e econômicos que afetam o desempenho das técnicas na estimulação da produção de óleo pesado.	BABADAGLI, 2003
Microbial Enhanced Oil Recovery: Research Studies in the Arabic Area During the Last Ten Years	Levantamento das experiências regionais na Arábia Saudita e no Egito, com técnicas de MEOR, e avaliação do potencial dessas técnicas.	SAYYOUH, 2002
World-Wide Applications of Microbial Technology for Improving Oil Recovery	Análise do estado da arte em técnicas de MEOR, conforme experiências relatadas na literatura e em congressos, visando organizar as aplicações por tipo de técnica.	BRYANT & LIDSEY, 1996
A Commercial Microbial Enhanced Oil Recovery Technology: Evaluation of 322 Projects	Compilação e geração de uma base de dados com um grande número de experiências de MEOR, organizada por características do reservatório.	PORTWOOD, 1995
M.O.R.E. to M.E.O.R.: An Overview of Microbially Enhanced Oil Recovery	Revisão das técnicas de MEOR empregadas à época, e discussão de fatores que ainda limitavam seu uso.	JACK, 1993
Review of Microbial Technology for Improving Oil Recovery	Descrição das técnicas de MEOR utilizadas à época, dos processos envolvidos, e de alguns resultados obtidos.	BRYANT & BURCHFIELD, 1989

Fonte: O autor.

Os estudos sobre as experiências realizadas com as técnicas de MEOR reconhecem que diversos fatores precisam ser avaliados de forma aprofundada, e que esses estudos poderiam demandar recursos significativos. Seria interessante, portanto, que esses estudos fossem compartilhados pelas empresas operadoras de determinadas áreas onde essas técnicas poderiam ser aplicadas. Para compreender como otimizar o uso das técnicas de MEOR na plataforma continental do Reino Unido (UKCS – *UK Continental Shelf*), por exemplo, foi proposto um projeto compartilhado para avaliar essas técnicas, incluindo o desenvolvimento da modelagem dos processos das principais técnicas; estruturação do projeto de engenharia envolvido; estudo dos micro-organismos, nutrientes e forma de aplicação/injeção; estudo das limitações operantes; e testes piloto para confirmar os resultados preliminares. Os seguintes parâmetros e questões foram propostos como forma de realizar a avaliação preliminar das técnicas de MEOR consideradas (HUGHES, 2002):

- A estimulação dos micro-organismos presentes nos reservatórios será suficiente para levar a cabo a técnica de MEOR, ou será necessário suplementar essas populações com medidas de bioaugmentação?
- Como serão afetados os processos corrosivos conforme o tipo de processo utilizado (aeróbico ou anaeróbico)?
- Quais seriam as consequências de suspender e substituir os tratamentos atualmente sendo realizados (como o uso de biocidas para o controle de BRS, por exemplo)?
- Quais resultados quantitativos e qualitativos são esperados, como parâmetro para medir o sucesso das intervenções?
- Quais os tipos e quantidades de nutrientes necessários estão previstos?
- Quais mecanismos se espera que sejam os principais fatores para os resultados desejados?
- Como devem ser avaliados os ensaios a serem realizados (indicadores e parâmetros)?
- Como poderá ser estabelecida uma base de comparação para os ensaios?
- Qual será o alcance dentro dos reservatórios, esperado para os micro-organismos atuantes na técnica estudada?

- Quais as questões logísticas que devem ser consideradas?
- Os processos contemplados estão sujeitos a alguma proteção intelectual (patentes)?
- Quais as questões comerciais que devem ser consideradas?
- Quais as consequências negativas que podem surgir com o emprego das técnicas de MEOR propostas?
- Quais são, e como calcular os custos envolvidos?

Esses parâmetros continuam representando questões fundamentais que devem ser estudadas para avaliar a viabilidade das técnicas de MEOR. Hoje, porém, possivelmente deveriam ser acrescentados parâmetros relativos às novas ferramentas utilizadas na seleção, controle, e monitoramento dessas técnicas, como:

- Quais ferramentas (convencionais e genéticas) de seleção de micro-organismos a serem utilizados devem ser utilizadas?
- Ferramentas genéticas devem ser utilizadas para modificar os micro-organismos que serão empregados nas técnicas de MEOR consideradas?
- Quais ferramentas genéticas, químicas, ou outras, deverão ser utilizadas para realizar o monitoramento físico, químico e microbiológico dos processos que ocorrerão nas técnicas de MEOR empregadas?
- Quais as consequências ambientais que poderiam advir do emprego das técnicas de MEOR consideradas?
- Quais medidas de controle estão previstas como forma de limitar ou cessar os processos realizados pelas técnicas de MEOR consideradas?
- Quais medidas de controle, mitigação ou remediação estão previstas para os possíveis impactos ambientais, em consequência do emprego das técnicas de MEOR?
- Quais medidas de controle, mitigação ou remediação estão previstas para os possíveis impactos indesejados no reservatório, em consequência do emprego das técnicas de MEOR?

4.1.1.2 Trabalhos Publicados sobre Avaliação e Métodos de Priorização de Técnicas de MEOR

Como parte da pesquisa bibliográfica realizada neste trabalho, algumas publicações foram organizadas na tabela seguinte, como referência sobre os estudos que apresentaram propostas de avaliação, modelagem e hierarquização das técnicas de MEOR, segundo certos critérios ou parâmetros das situações onde essas técnicas poderiam ser aplicadas (Tabela 2).

Tabela 2 - Exemplos de trabalhos publicados sobre avaliação e métodos de priorização de técnicas de MEOR a serem empregadas

Título do Trabalho	Descrição	Referência
Microbial enhanced oil recovery (MEOR)	Avaliação das propostas de outros autores, sobre os critérios e requisitos para priorizar a aplicação de técnicas de MEOR, apresentados por cada um.	BROWN, 2010
Comprehensive Investigation of the Biogeochemical Factors Enhancing Microbially Generated Methane in Coal Beds	Avaliação dos fatores que podem afetar o desempenho de processos de produção microbiana de metano.	NETL, 2008
Simulation of Microbial Enhanced Oil Recovery	Desenvolvimento de um programa para simular a aplicação de técnicas de MEOR, conforme alguns parâmetros de reservatórios, visando prever o desempenho esperado.	GHADIMI & ARDJMAND 2006
A Method to Predict MEOR Benefits on a Field Basis	Descrição do uso de uma ferramenta de modelagem (STARS) para prever o desempenho de técnicas de MEOR	BREALEY, 2003a
Improved Oil Recovery from Upper Jurassic Smackover Carbonates through the Application of Advanced Technologies at Womack Hill Oil	Projeto para avaliar as técnicas de MEOR aplicadas em carbonatos jurássicos de Alabama, EUA, com foco na análise dos resultados e em simulações 3D, visando identificar as técnicas com melhor desempenho.	MANCINI et al, 2003
Considerations for modeling bacterial-induced changes in hydraulic properties of variably saturated porous media	Apresentação de considerações para otimizar a aplicação de técnicas de MEOR em meios porosos.	ROCKHOLD et al 2002
DTI MEOR Workshop: A Participant's View	Avaliação das considerações na escolha das técnicas de MEOR mais apropriadas, e de fatores que podem afetar o desempenho dessas técnicas.	GOODYEAR, 2002
Simulations of Chemical and Microbial Enhanced Oil Recovery Methods	Desenvolvimento de um simulador multifásico, multicomponente, de porosidade dupla, para modelar e prever o desempenho de técnicas de MEOR que dependem da dispersão hidrodinâmica do fluido injetado.	DELSHAD et al, 2002
Optimization of Microbial Flooding in Carbonate Reservoirs	Avaliação de diversos parâmetros relativos à engenharia de reservatórios, que podem ser controlados e que influenciam o sucesso das técnicas de MEOR.	ALMEHAIDEB & ZEKRI, 2002
Waterflooding Optimization Using Biotechnology: 2-Year Field Test, La Ventana Field, Argentina	Estudo de técnicas de MEOR aplicadas na Argentina, para melhorar o varrido de água injetada, visando identificar as técnicas com melhor desempenho e possibilidade de aplicação em outros casos.	MAURE et al, 2001
Reservoir Engineering Analysis of Microbial Enhanced Oil Recovery	Avaliação de técnicas de MEOR do ponto de vista da engenharia de reservatórios e das reações envolvidas, e avaliação do potencial dessas técnicas.	BRYANT & LOCKHART, 2000
EOR Screening for Ekofisk	Uma avaliação e hierarquização de diferentes métodos de EOR, incluindo MEOR, para sugerir os que merecem mais testes piloto, e estimando o potencial de recuperação de cada um, e as considerações logísticas para aplicação no Mar do Norte.	JENSEN, HARPOLE, ØSTHUS, 2000
Systematic Extensive Laboratory Studies of Microbial EOR Mechanisms and Microbial EOR Application Results in Changqing Oilfield	Avaliação de técnicas de MEOR utilizadas em um grande número de experiências na China, visando sugerir os mecanismos mais eficazes para alcançar determinados objetivos específicos.	DENG et al, 1999
Modelling and laboratory investigation of microbial enhanced oil recovery	Desenvolvimento de modelagem dos mecanismos de MEOR, envolvendo parâmetros físicos e microbiológicos, para prever o desempenho de diversas combinações de condições de aplicação.	DESOUKY et al, 1996
Microbial EOR Technology Advancement: Case Studies of Successful Projects	Avaliação de diversas experiências com técnicas de MEOR, visando descrever o desempenho de cada uma em reservatórios dolomíticos e de arenitos.	DIETRICH et al 1996
MEOR, the Suitable Bacterial Inoculum According to the Kind of Technology Used: Results From Romania's Last 20 Years' Experience	Uma revisão das técnicas de MEOR utilizadas até então, visando identificar as cepas mais adequadas para certas condições de aplicação, com base em experiências na Romênia.	LAZAR, STEFANESCU, DOBROTA, 1994
Using Bacteria to Improve Oil Recovery from Arabian Fields	Avaliação de técnicas de MEOR, conforme critérios de aplicabilidade desenvolvidos para diversos parâmetros, em mais de 300 formações em países árabes.	SAYYUOH & AL-BLEHED, 1993
Biotechnology and Enhanced Petroleum Production	Uma avaliação de seis das principais técnicas de MEOR utilizadas à época, buscando identificar quais seriam mais apropriadas em determinadas condições.	SAXMAN, 1984

Fonte: O autor.

O tema de MEOR também foi objeto de diversos congressos e outros eventos, onde muitos pesquisadores puderam discutir as técnicas e as experiências com MEOR, relatadas na literatura. Isso permitiu que fossem realizados levantamentos, formais e informais, do sentimento dos pesquisadores e usuários das técnicas de MEOR, em relação ao histórico das aplicações realizadas, e também sobre o potencial dessas técnicas e sobre os prováveis cenários futuros para MEOR em geral.

Em um desses eventos (II Curso Internacional Biotechnology and Petroleum), realizado em Caracas, Venezuela, em 2009, ficou claro que grande parte dos participantes via o potencial de MEOR como sendo decisivo para o desenvolvimento futuro da indústria de petróleo e gás, que cada vez mais faria uso de técnicas de MEOR. Também ficou claro que os cenários futuros projetados para essas técnicas indicavam forte participação de algumas técnicas, mas não tanto de outras, e que seu desenvolvimento se daria de forma diferenciada, considerando as grandes dificuldades e o desconhecimento em relação a sua operacionalidade (IDEA, 2009b). Isto apenas reforça a importância do objetivo amplo desta tese, de convencer os players mundiais da indústria de energia (NOCs, IOCs, OSCs e governos), de que as técnicas de MEOR podem proporcionar grandes vantagens para aqueles que exploram os recursos energéticos, especialmente o petróleo e gás. A chave está justamente em realizar mais estudos e ampliar o conhecimento de como operam os fundamentos dessas técnicas, e de como elas podem ser aplicadas para atingir o pleno potencial de MEOR.

4.2 Trabalhos Preparados para Publicação e Apresentação

Como parte das pesquisas realizadas sobre o tema de MEOR, algumas técnicas de maior interesse para o autor, assim como para outros colegas pesquisadores do mesmo tema, foram pesquisadas, e trabalhos produzidos para publicação e apresentação em diversos fóruns.

Em relação aos trabalhos e pesquisas realizados pela equipe do Prof. Paulo Almeida, o autor colaborou na elaboração de alguns trabalhos, alguns dos quais

foram enviados para publicação ou apresentação, e outros ainda estão sendo elaborados.

Para os trabalhos enviados para publicação, foram escolhidos periódicos especializados, da área de biotecnologia aplicada, focados, por exemplo, na:

- disseminação do conhecimento nas áreas de biomassa, tratamento de resíduos biológicos, transformações bioenergéticas, recursos bioenergéticos e tecnologias correlatas, abordando produção, modelagem e avaliação econômica dos biocombustíveis, bioprocessos e bioprodutos, bioconversão e utilização de biomassa e matérias primas provenientes de resíduos agroindustriais, proteção ambiental e tratamento biológico de resíduos, e conversão de biomassa (ELSEVIER, 2013a); e
- disseminação do conhecimento em áreas inovadoras da biotecnologia, genética, biologia molecular, engenharia bioquímica e de bioprocessos, e modelagem computacional desses processos, abordando biologia molecular, DNA, bioquímica, fisiologia, engenharia de bioprocessos, processos industriais, novos produtos, biotecnologia relacionada à agroindústria, genômica e bioinformática (ELSEVIER, 2013b).

Para apresentação em congressos, foi escolhido o International Symposium on Applied Microbiology and Molecular Biology in Oil Systems (ISMOS4), importante congresso internacional sobre temas relacionados à microbiologia do petróleo, ocorrido no CENPES, no Rio de Janeiro, Brasil, entre 25 e 28 de agosto de 2013 (INT, 2013). O ISMOS4 foi organizado pelo Instituto Nacional de Tecnologia (INT), e entre seus coordenadores estavam Dr. Torben Lund Skovus, da Noruega; Dr. Sean N. Caffrey, da Universidade de Calgary, no Canadá; e Dra. Marcia T. S. Lutterbach, Gerente do LABIO – Laboratório de Biocorrção e Biodegradação do INT. O evento teve a participação de importantes entidades, como: Petrobras; Centro de Tecnologia SENAI Solda; Det Norske Veritas (DNV); Danish Technological Institute; University of Essex; Genome Alberta; Instituto Nacional de Tecnologia; Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação; Associação Brasileira de Corrosão. Um evento desse porte prestigia tanto as entidades e indivíduos participantes, como o Brasil, por poder atrair um evento de tal envergadura, no contexto internacional.

Diversos temas relacionados à aplicação de técnicas e ferramentas biológicas e microbianas à indústria de petróleo e gás foram incluídos, especialmente envolvendo os problemas industriais causados por micro-organismos, como a biocorrusão, assim como processos microbiológicos benéficos, como MEOR, bioconversão, e outros. O objetivo foi entender melhor os processos, como controlar seu desempenho, e a busca pela otimização do desempenho das técnicas de MEOR aplicadas em campo.

Renomados pesquisadores na área de MEOR foram palestrantes, incluindo colegas do autor, como Dr. Hans Kristian Kotlar, da Statoil, e também teve a participação de apresentadores de pôsteres, como alunos da UFBA, do Prof. Paulo Almeida, e da UFRN, do Prof. Carlos Blaha. Os temas abordados tiveram especial importância, pois o autor teve a oportunidade de trabalhar com esses três pesquisadores em outras ocasiões, em temas semelhantes, relacionados com MEOR, como no 2nd International Course Biotechnology and Petroleum, realizado em Caracas, Venezuela, em 2009 (IDEA, 2009b), e em projetos de pesquisa sobre MEOR, que vêm sendo preparados para serem apresentados a órgãos de pesquisa nacional.

4.2.1 Exclusão Biocompetitiva de BRS

Na indústria do petróleo, assim como em inúmeras outras, a biossulfetogênese, ou seja, a produção de gás sulfídrico (H_2S , ou sulfeto de hidrogênio) por BRS, é um sério problema em todo o mundo, pois causa a corrosão acelerada de diversos metais. A biossulfetogênese atinge os campos petrolíferos, causando danos às instalações metálicas, prejuízos, e risco à saúde das pessoas e ao meio ambiente. Tradicionalmente, a indústria de petróleo utiliza tratamentos com biocidas para tentar controlar as BRS, mas os resultados não têm sido satisfatórios, pois o uso dos biocidas resulta em micro-organismos resistentes a esses compostos. O custo desses produtos também é elevado, o que levou a indústria do petróleo a buscar alternativas para resolver o problema da biossulfetogênese (CARVALHO, 2007; LIN e BALLIM, 2012).

Os principais gêneros de BRS são *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum* e *Desulfomonas*; a espécie mais relevante para os processos biocorrosivos é a *Desulfovibrio desulfuricans*. Numa demonstração do poder da simbiose microbiana, as BRS frequentemente se desenvolvem em ambientes protegidos, proporcionados pelo crescimento de outros micro-organismos que formam biofilmes protetores, formando microambientes (anaeróbicos) favoráveis ao crescimento das BRS, mesmo em condições com elevada presença de oxigênio ou agentes inibidores, tornando, assim, seu combate mais difícil (LIN e BALLIM, 2012).

Por isso é de suma importância para a indústria do petróleo e outras, desenvolver e avaliar alternativas para os meios convencionais de combate às BRS, como a Tecnologia de Exclusão Biocompetitiva – TEB (ou BET – *Biocompetitive Exclusion Technology*, ou ainda, BCX - *Biocompetitive Exclusion Technology*). Como a TEB já é relativamente bem conhecida e compreendida, atualmente é importante focar esforços em formas de tornar essa tecnologia ainda mais eficiente, especialmente através de inovações que permitam reduzir o custo dos insumos ou aumentar sua eficácia.

Esses são justamente os objetivos da linha de pesquisa do Prof. Paulo Almeida e seu grupo de pesquisa, em relação à biosulfetogênese e à corrosão induzida microbiologicamente (MIC - *microbially induced corrosion* ou *microbially influenced corrosion*). O Laboratório de Biotecnologia e Ecologia de Microrganismos (LABEM) da UFBA, sob a coordenação do Prof. Paulo Almeida, desenvolve trabalhos de pesquisa e extensão na área de microbiologia desde 1986, e tem contribuído com o desenvolvimento de indústrias produtoras de agentes antimicrobianos, indústrias produtoras e processadoras de alimentos, indústrias de mineração, e a indústria do petróleo (LABEM, 2013). Um dos projetos sobre MIC e seu controle com a TEB, proposto pelo grupo de pesquisa do Prof. Paulo Almeida, foi contemplado pela Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério da Ciência e Tecnologia (FINEP), em 2005, demonstrando o elevado grau de interesse nacional pelo tema (FINEP, 2005). Dadas as perdas com a biocorrção em nível nacional (e internacional), possíveis soluções mais eficazes e eficientes para o problema da MIC representavam, como ainda representam, uma questão estratégica para a indústria nacional.

O autor teve a oportunidade de conhecer de perto alguns dos trabalhos desenvolvidos pelo Prof. Paulo Almeida em várias oportunidades (a última em 2013),

e constatou a importância e o valor dessas pesquisas para indústria, já que várias empresas têm contratado serviços de consultoria por conta dos trabalhos desenvolvidos relativos ao controle microbiológico de MIC, especialmente através da TEB.

4.2.1.1 TEB e matrizes poliméricas complexantes

Um dos trabalhos submetidos para publicação (*Development and Application of the Biocompetitive Exclusion Technology in the Control of Biogenic Sulfide in the Oil Industry*) tem, portanto, como foco principal a avaliação do controle da biossulfetogênese, utilizando técnicas inovadoras, envolvendo o uso conjunto de inibidores de BRS e matrizes poliméricas complexantes, que potencializam o efeito desses compostos, reduzem a concentração necessária de inibidores, e tornam o método mais barato e viável. Este trabalho, em inglês, está reproduzido na íntegra no Apêndice E - Trabalho submetido para publicação em periódico da área de biotecnologia (no prelo).

Os estudos desse trabalho permitiram otimizar as metodologias utilizadas para desenvolver a TEB e avaliar sua eficiência no controle da biossulfetogênese. Amostras de água produzida e de água injetada foram coletadas de campos de petróleo, para avaliar a dinâmica das populações de BRS, assim como aquelas coletivamente denominadas bactérias Petrobióticas (bactérias que oxidam sulfato, e aquelas que reduzem compostos análogos de sulfato). A concentração crítica ideal foi determinada para os análogos de sulfato, tais como nitrato, molibdato de sódio, tungstenato, e metavanadato, e para os agentes inibidores de BRS, tais como nitrito. O efeito de três matrizes complexantes, em combinação com esses compostos, também foi avaliado, visando aumentar o desempenho do processo. Com a TEB e o uso desses compostos complexantes, a redução percentual média da concentração de sulfeto foi de 99,9%. Dessa forma, a TEB se mostrou eficaz, e pode ser considerada uma alternativa para as soluções atualmente empregadas para combater a geração de sulfeto na indústria do petróleo.

Os estudos sobre a mitigação da biossulfetogênese utilizando BRS resistentes a biocidas e tratamentos com nitrato mostraram que a utilização de

análogos de sulfato, além de nitrito, em combinação com matrizes poliméricas complexantes, reduziu a concentração necessária desses inibidores de BRS, em relação às concentrações necessárias no caso da aplicação direta desses inibidores. Isto tornou viável a utilização de inibidores nas aplicações em campo. Os melhores resultados na mitigação da biossulfetogênese foram obtidos com uma combinação de molibdato (247 mg.L^{-1}) e nitrito (69 mg.L^{-1}), em combinação com a matriz PEG (polietilenoglicol), que reduziu a concentração de sulfeto a menos de 1 mg.L^{-1} , mesmo usando água do mar. Dessa forma, o uso de matrizes poliméricas complexantes permitiu o desenvolvimento de novos produtos com maior eficácia.

Algumas conclusões significativas podem ser destacadas:

- O uso de matrizes poliméricas complexantes (PEG) reduz as concentrações necessárias de agentes inibidores da corrosão microbiana;
- Isso faz com que os análogos de sulfato e o nitrato se tornem viáveis como inibidores da corrosão microbiana;
- A melhor mitigação da biossulfetogênese é obtida com molibdato e nitrito, em combinação com uma matriz polimérica complexante (PEG);
- A concentração de sulfeto pode ser reduzida para menos de 1 mg.L^{-1} , mesmo usando água do mar;
- As matrizes poliméricas complexantes permitiram que novos produtos, com melhor eficácia, fossem desenvolvidos.

4.2.1.2 TEB e as Variáveis do Controle de BRS

Um dos trabalhos apresentados no ISMOS4 (*Development and Application of the Biocompetitive Exclusion Technology in the Control of Biogenic Sulfide in the Oil Industry*) teve como objetivo relatar estudos da identificação e avaliação das principais variáveis envolvidas na TEB para o controle da atividade de BRS em campos petrolíferos *offshore*. A geração microbiana sulfeto (biossulfetogênese) pode ser controlada pelo estímulo à atividade de linhagens que competem fisiologicamente com as BRS; essas linhagens são denominadas bactérias

petrobióticas. Amostras de água produzida e injetada foram coletadas de quatro diferentes campos petrolíferos da Petrobras, na Bahia, Brasil. As seguintes linhagens de BRS foram identificadas (com 16SrRNA): *Desulfovibrio vulgaris*, *Desulfovibrio alaskensis*, *Desulfovibrio capillatus*, *Desulfovibrio* sp., *Desulfobacter* sp., *Desulfosarcina* e *Desulfotomaculum* spp. As seguintes linhagens de bactérias petrobióticas foram igualmente identificadas: *Halomonas salina*, *H. aquamarina*, *H. meridiana*, *Halomonas* sp., *Marinobacter aquaeolei*, *M. hydrocarbonoclasticus* e *Marinobacter* sp. A TEB foi estimulada com adição de análogos de sulfato, tais como nitrato, molibdato de sódio, tungstenato, metavanadato, e agentes inibidores de BRS, tais como nitrito. O efeito de três diferentes matrizes poliméricas complexantes utilizadas como substrato para o crescimento dos micro-organismos também foi avaliado, em combinação com esses compostos. O objetivo foi melhorar a eficiência processos da TEB. Análises estatísticas confirmaram que, em média, a produção de sulfeto foi reduzida em 200 vezes (para $\sim 0,82 \pm 0,11 \text{ mg L}^{-1}$), quando comparada com os valores médios obtidos com os controles, mas sem o tratamento da TEB ($\sim 200 \pm 23,5 \text{ mg L}^{-1}$). Apesar de que *Marinobacter* e *Halomonas* foram as espécies predominantes de bactérias petrobióticas detectadas pelos métodos de detecção molecular e de cultura, parece que os tipos de bactérias helicoidais eram os que estavam envolvidos na TEB, conforme análises por microscopia fluorescente.

Este trabalho, em inglês, está reproduzido na íntegra no Apêndice C – Pôster apresentado no ISMOS4.

4.2.2 Produção Microbiana de Biossurfatantes para Aplicações em MEOR

As técnicas de MEOR envolvendo a produção microbiana de biossurfatantes têm atraído o interesse dos pesquisadores, por se tratar de uma forma eficaz de conseguir alterar as propriedades dos óleos pesados de um reservatório, pois os princípios operantes são bem compreendidos, inclusive sendo amplamente utilizados nos métodos químicos de EOR que usam surfatantes químicos injetados nos reservatórios, para obter os mesmos resultados.

Os biossurfatantes, ou surfatantes produzidos por micro-organismos durante seus processos metabólicos normais, da mesma forma que os surfatantes químicos,

podem reduzir a tensão superficial e interfacial do óleo aprisionado dentro de reservatórios. Mas eles possuem uma série de vantagens em relação aos surfatantes químicos, pois são menos tóxicos, mais biodegradáveis, e apresentam maior estabilidade em relação a variações de temperatura, salinidade e pH (DAMIÃO et al., 2013). Os biossurfatantes, além de poderem ser produzidos microbiologicamente *in situ* (aplicação da técnica de MEOR envolvendo produção de biossurfatantes *in situ*), podem ser utilizados no lugar dos surfatantes químicos, nos métodos químicos de EOR envolvendo a injeção de surfatantes. Desta forma, esta técnica também poderia ser considerada uma técnica de MEOR, pois mesmo não se tratando de produção microbiológica *in situ*, o produto essencial à técnica é produzido microbiologicamente.

Os biossurfatantes em geral têm uma grande aplicação e importância na indústria do petróleo, pois podem ser utilizados da mesma forma que os surfatantes químicos, com as vantagens adicionais destacadas acima. Seu preço e sua disponibilidade em grande escala são possíveis entraves para sua maior utilização em técnicas de EOR envolvendo a injeção de biossurfatantes. Como a produção de biossurfatantes é um dos principais temas das pesquisas do grupo de pesquisa do Prof. Paulo Almeida, este também foi um tema sobre o qual o autor e seus colegas coautores se debruçaram, elaborando um artigo submetido para publicação em um periódico da área de biotecnologia.

Entre os biossurfatantes, os mais estudados são os ramnolipídeos, produzidos por bactérias do gênero *Pseudomonas*. O estudo de como estes biossurfatantes são produzidos por diferentes tipos de micro-organismos pode sugerir formas mais eficazes e eficientes de produção desses importantes produtos para o setor de serviços de MEOR, onde são utilizados em grande escala. Se seu preço puder ser reduzido, com formas mais eficientes de produção, seu uso no setor de serviços de MEOR certamente poderia ser significativamente ampliado. Adicionalmente, o estudo de diferentes meios de produção desses produtos se reveste de importância adicional, pois o meio de produção representa uma forma de dar uma finalidade produtiva aos resíduos da agroindústria, como a glicerina (subproduto da produção de biodiesel). Com a atual elevada produção de biodiesel, a glicerina também tem oferta abundante, e apresenta preços baixos; representa, ainda, um risco ambiental potencial, se descartada inadequadamente, pois os baixos preços desestimulam seu aproveitamento ideal e correto.

A glicerina no mercado pode ser encontrada em dois tipos (especificações): comercial (pura, refinada, com elevado padrão de qualidade, e bastante cara); e bruta, proveniente da produção de biodiesel (com especificações menos exigentes, e bem mais barata). Desta forma, o trabalho submetido para publicação buscou aliar o estudo de formas mais eficazes e eficientes de produção de ramnolipídeos (com o aproveitamento da glicerina bruta), e o estudo, através de ferramentas genéticas, de linhagens que apresentam melhor desempenho nessa produção.

4.2.2.1 Produção de Ramnolipídeos

Um dos trabalhos submetidos para publicação (*Pseudomonas aeruginosa Rhamnolipid Expression Genes in Saline Mineral Glycerin Media*) tem como foco principal a investigação da produção de ramnolipídeos por duas linhagens de *Pseudomonas aeruginosa* (CCMICS 106 e CCMICS 109), através da observação da semelhança da expressão gênica de ambas as cepas, cultivadas em dois tipos de meios de produção, em tempos diferentes. Este trabalho, em inglês, está reproduzido na íntegra no Apêndice F - Trabalho submetido para publicação em periódico da área de biotecnologia (no prelo).

A quantificação de ramnolipídeo foi realizada através do método orcinol-ácido sulfúrico, e a análise da expressão gênica dos genes que codificam as enzimas responsáveis pela produção de ramnolipídeo foi realizada com a técnica de PCR em tempo real. Os resultados mostraram que no meio de produção denominado MSM2%GB (meio de cultura mineral salino com 2% de glicerina bruta), a linhagem CCMICS 106 apresentou uma maior produção, assim como apresentou também uma maior expressão do gene *rhIAB*, que constitui o *operon* responsável pela produção de ramnolipídeo. No meio de produção denominado MSM2%GC (meio de cultura mineral salino com 2% de glicerina comercial), a linhagem CCMICS 109 apresentou uma maior produção, mas neste meio de produção a expressão do gene *rhIAB* foi menor, sugerindo que mesmo uma expressão mínima deste gene pode resultar numa elevada produção de ramnolipídeo.

No meio de produção MSM2%GC, o gene *rhIAB* exibiu a maior expressão, e a maior produção foi atingida com a cepa CCMICS 106. Em ambos os meios de

produção, o gene *rhIC* exibiu a maior expressão com a cepa CCMICS 109, sugerindo que esta cepa possa ser uma boa produtora de di-ramnolipídeo. Com base na expressão gênica do gene *rhIAB*, mono-ramnolipídeo foi produzido, que pode agir como receptor, produzindo di-ramnolipídeo. Para avaliar a produção de di-ramnolipídeo, é necessário avaliar a produção de ambos os genes *rhIC* e *rhIAB*, pois a produção de di-ramnolipídeo depende da disponibilidade de mono-ramnolipídeo. Dependendo da fonte de carbono utilizada, e no tipo de cepa bacteriana, uma expressão mínima de um gene pode ser bastante significativa na determinação de uma boa produção, pois uma baixa expressão gênica no meio de produção MSM2%GC foi suficiente para produzir praticamente a mesma quantidade de biossurfatante que no meio de produção MSM2%GB.

Algumas conclusões significativas podem ser destacadas:

- Há uma expressão diferencial entre os genes *rhIC* e *rhIAB*, em ambos os meios de produção;
- A expressão gênica dos genes responsáveis pela produção de ramnolipídeo depende da cepa produtora, do meio de produção, e do tempo de incubação;
- A expressão máxima do gene *rhIAB* não implica, necessariamente, em maior produção de ramnolipídeo;
- A glicerina bruta é mais indicada para a produção de ramnolipídeo, devido ao seu custo mais baixo;
- Ficou comprovado que cenários positivos de produção de ramnolipídeos podem ser construídos utilizando resíduos agroindustriais.

4.2.2.2 Produção de Biossurfatante Utilizando Glicerina Bruta

Um dos trabalhos apresentados no ISMOS4 (Production of biosurfctant utilizing raw glycerin, a sustainable biotechnological alternative) mostrou como a glicerina bruta pode ser uma alternativa viável como fonte de carbono na produção de biossurfatantes.

Os biossurfatantes têm sido objeto de estudos em várias áreas da biotecnologia, pois eles têm propriedades que se aplicam em muitas indústrias, e especialmente na indústria do petróleo. Entre os glicolipídeos, os mais estudados são os ramnolipídeos produzidos pelas bactérias do gênero *Pseudomonas*. Entre as alternativas para melhorar sua produção em larga escala, e reduzir seu custo, estão o uso de fontes de carbono provenientes de produtos reciclados, como a glicerina bruta, que é um subproduto da produção de biocombustíveis (biodiesel), e cujo preço de mercado está cada vez mais deprimido. O uso da glicerina foi testado como alternativa de fonte de carbono (FC) para cultivar duas linhagens de *Pseudomonas aeruginosa*. Elas foram cultivadas em um meio de produção mineral salino (MSM) com 2% de glicerina comercial (GC), ou glicerina bruta (GB), como a FC. Foram realizadas análises da tensão superficial (TS) e da estabilidade dos biossurfatantes produzidos. Os resultados mostraram que para a linhagem CCMICS 106, não houve diferença significativa entre os meios de produção, mas para a linhagem CCMICS 109, houve maior produção de ramnolipídeos (RL) na MSM2%GC. Na MSM2%GB, as linhagens CCMICS 106 e 109 produziram, respectivamente, 2,87 g/L e 2,31 g/L, enquanto que na MSM2%GC elas produziram, respectivamente, 2,47 g/L e 3,96 g/L. Análises cromatográficas sugerem que um tipo de mono-ramnolipídeo foi produzido. O RL alcançou uma redução na TS de 60,02mN/m para 26-30mN/m, e também apresentou boa estabilidade em relação a temperatura, salinidade, e pressão. Os resultados demonstram a viabilidade do uso de glicerina bruta como substrato para a produção de RL, como alternativa de baixo para a FC.

Este trabalho, em inglês, está reproduzido na íntegra no Apêndice D – Pôster apresentado no ISMOS4.

4.2.3 Produção Microbiana de Xantana para Aplicações em MEOR

Na indústria do petróleo, os biopolímeros, como a xantana, são utilizados em lamas de perfuração, para lubrificação da broca e estabilização do cascalho, devido às suas propriedades de elevada viscosidade mesmo em baixas concentrações, e estabilidade nas condições agressivas e variáveis de perfuração (PRADELLA, 2006).

Só essa aplicação na indústria do petróleo já justificaria um foco nas pesquisas para tornar as fontes e preços desses biopolímeros industriais mais competitivos para a indústria. Mas na indústria do petróleo, eles também são utilizados em técnicas de EOR (e MEOR), que envolvem a injeção de polímeros (ou biopolímeros, ou sua produção *in situ*) para alcançar objetivos como a formação de soluções de elevada viscosidade. Essas soluções são injetadas em poços (ou produzidas dentro das rochas dos reservatórios) para obstruir os poros da rocha em regiões onde há caminhos preferenciais que permitem a livre passagem da água injetada, e impedem um varrido eficiente e adequado. Essas técnicas são conhecidas, em EOR, como técnicas modificação do perfil de permeabilidade do reservatório, e em MEOR, como técnicas de redirecionamento da varredura de água injetada (MFD - *Microbial Flow Diversion*), que fazem com que a injeção normal de água volte a realizar um bom varrido, elevando a produção do óleo. Esses tipos de técnica de EOR e MEOR já são relativamente comuns.

Dentre os biopolímeros (polímeros produzidos por processos biológicos ou microbiológicos), os de maior importância são: polilactato (PLA), polihidroxialcanoato (PHA), polímeros de amido (PA), e a xantana. Somente a xantana, em 2015, terá um mercado estimado em US\$ 400 milhões e 80.000 t/ano, com taxa de crescimento entre 5% e 10% ao ano. A goma Xantana é considerada um polissacarídeo de referência, por ser relativamente barato, devido à alta conversão do substrato em polímero (60% a 70%), durante sua produção, e devido a sua aplicabilidade industrial, sendo as principais a alimentícia, a farmacêutica e a industrial (PRADELLA, 2006). A goma xantana é um polissacarídeo natural descoberto nos anos 1950 e vendido desde os anos 1960, sintetizado por bactérias do gênero fitopatogênico *Xanthomonas*, especialmente a *Xanthomonas campestris*, em resposta ao estresse devido a condições ambientais, como dessecação, etc. (LUVIELMO e SCAMPARINI, 2009; RAMOS et al., 2013).

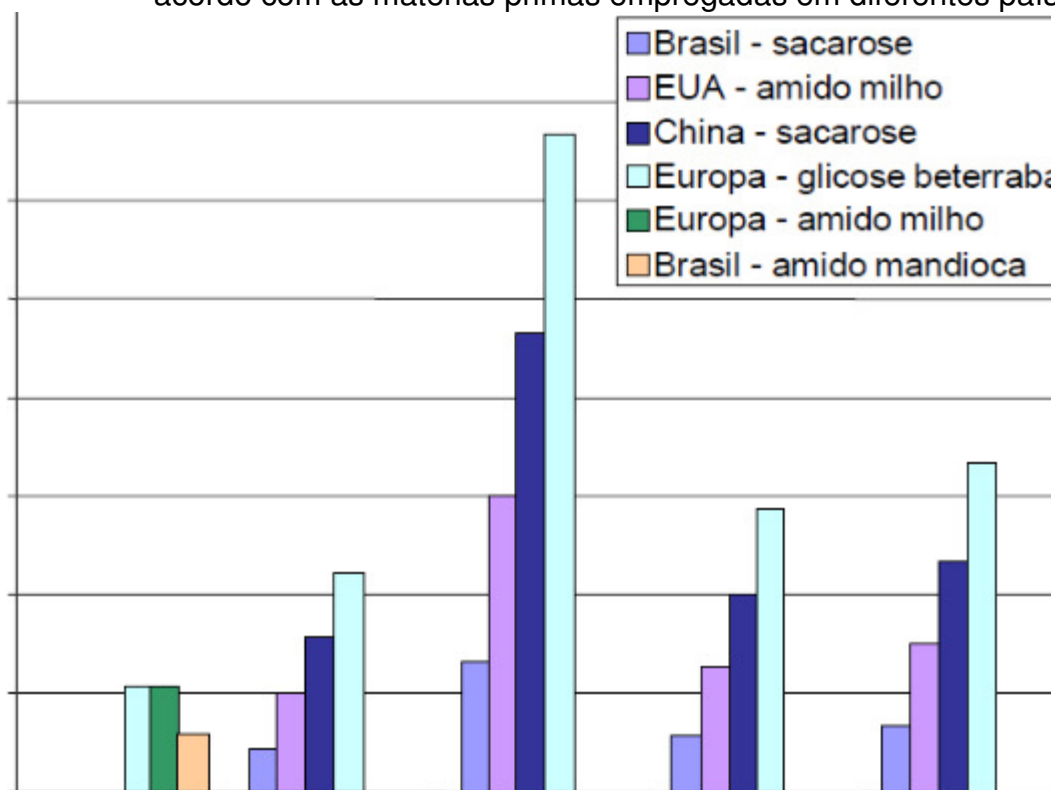
Para produzir as soluções de alta viscosidade que devem ser injetadas, nas técnicas de EOR e MEOR, é necessário misturar polímeros industriais que elevem a viscosidade da solução injetada, ou da água *in situ*. Um dos polímeros mais utilizados para esses fins é a goma xantana. Como o volume de água injetada pode ser muito grande, a quantidade de xantana também pode ser muito grande, pressionando a disponibilidade das fontes do produto, e seu preço. No Brasil, quase a totalidade de seu consumo é de origem importada, principalmente da China,

apesar do potencial do Brasil para se tornar um grande fornecedor em nível mundial, devido à abundância e baixo custo dos principais insumos, como a sacarose e o álcool etílico (provenientes da cana de açúcar), utilizados como substrato da fermentação e para a separação da goma, respectivamente (LUVIELMO e SCAMPARINI, 2009).

Apesar da maioria dos estudos sobre a produção de goma xantana ter sido realizada com *Xanthomonas campestris*, é importante lembrar que, dada a imensa variedade das características dos micro-organismos na natureza, o isolamento de micro-organismos a partir de ambientes naturais ainda representa uma importante ferramenta na busca por cepas que possam apresentar uma melhor produção de xantana, assim como qualidades reológicas necessárias para otimizar o desempenho das técnicas de MEOR que utilizam esses biopolímeros (BORGES e VENDRUSCOLO, 2008).

Dada a vantagem competitiva do Brasil, em relação aos insumos para a produção de xantana, seria uma pena desperdiçar essa vantagem, deixando de instalar uma indústria que atenda à demanda nacional, e mesmo internacional, desse produto. Como pode ser visto na Figura 27, no Brasil, teoricamente, haveria possibilidade de produção com custo muito inferior ao que se aplicaria em outros países, inclusive a China, maior fornecedor mundial. No Brasil, como em outros países, a situação de elevado consumo de xantana e baixa ou nenhuma produção industrial demonstra a importância de investigar alternativas que possam melhorar o desempenho e eficiência da produção.

Figura 27 - Custo de produção (em US\$/tonelada) de diferentes biopolímeros, de acordo com as matérias primas empregadas em diferentes países



Nota: Destaque para a xantana no Brasil, onde, teoricamente, haveria possibilidade de produção com custo muito inferior ao de outros países. (PA – polímeros de amido; PLA – polilactato; PHA – polihidroxialcanoato; XAN – xantana; PUL – pululana).

Fonte: PRADELLA, 2006.

Essa importância estratégica para o país foi entendida pelo estudo encomendado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio, ao Laboratório de Biotecnologia Industrial do Centro de Tecnologia de Processos e Produtos (LBI/CTPP), para elaboração da Política de Biotecnologia Industrial no Brasil (PRADELLA, 2006). Entre as recomendações indicadas para as iniciativas técnicas que deveriam ser realizadas nos anos seguintes, estavam aporte de recursos para:

- Obtenção de linhagens eficientes na produção da goma xantana com características requeridas pelo mercado;
- Estudo em escala de laboratório visando a otimização do processo: obtenção de altas concentrações celulares e de produto;
- Estudo em escala de laboratório com células imobilizadas;

- Estudo de processos de separação da goma xantana;
- Estudo em escala piloto: ampliação de escala.

Dessa forma, fica clara a importância de estudar o uso de substratos alternativos, tais como os resíduos industriais que atualmente são descartados sem valor, e ainda representam um risco ao meio ambiente, mas que podem ser aproveitados como insumos de baixo custo. A água produzida, por exemplo, oriunda do processo de produção em certos campos petrolíferos, tem representado um desafio para o descarte adequado e redução dos impactos ambientais (CARVALHO, 2011). Da mesma forma, o melhor aproveitamento do biodiesel passa pelo seu uso em aplicações que valorizam mais esse resíduo da indústria de biocombustíveis. De fato, o uso dos resíduos da agroindústria tem se transformado em um objetivo cada vez mais frequente, em pesquisas sobre a produção de xantana (RAMOS et al., 2013).

No Brasil, só se tem registro de produção nacional de goma xantana pela empresa Quantas Biotecnologia S.A., a qual tem uma pequena planta semi-industrial implantada no Centro de Tecnologia Industrial Pedro Ribeiro, do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI/Cetind, em Salvador, Bahia, e mantém parceria com o GENPES/Petrobras, através de Acordo de Cooperação Tecnológica firmado desde 2002. Os esforços de pesquisa e desenvolvimento da empresa resultaram em sete pedidos de patente no Instituto Nacional de Propriedade Industrial – INPI, que incluem a utilização de substratos alternativos para produção da goma xantana, coprodução com outros biopolímeros, produção de enzimas, entre outros. A Quantas pretende instalar uma nova unidade para produção industrial de goma xantana produzida através de processo biotecnológico fermentativo, com o micro-organismo *Xanthomonas campestris*, cuja capacidade de produção (6.400 ton/ano) deverá ser suficiente para reverter o quadro de importações de goma xantana no Brasil, que consome, segundo a empresa, aproximadamente 4.000 a 4.300 ton/ano, e apresenta crescimento da demanda de 10% a 15% ao ano, ainda maior do que o estimado por outros estudos (QUANTAS BIOTECNOLOGIA S.A., 2013).

No sentido de buscar atender as prioridades destacadas no relatório do LBI/CTPP, foram desenvolvidas pesquisas sobre a produção de biopolímeros, especialmente da goma xantana, pelo grupo de pesquisa do Prof. Paulo Almeida, na UFBA. Fruto dessa iniciativa, diversos trabalhos foram elaborados, entre os quais

um em que o autor participou como coautor (“Sustainable Production of Xanthan Gum in Wastes of the Energy Industry”), ainda sem ser submetido para publicação. O objetivo foi avaliar a bioprodução de xantana utilizando resíduos da indústria do petróleo (água produzida) e da produção de biodiesel (glicerina bruta).

4.2.3.1 Produção de Xantana com Água Produzida de Poços de Petróleo

Um dos trabalhos sendo preparados para submissão em periódico ainda a ser escolhido (*Sustainable Production of Xanthan Gum in Wastes of the Energy Industry*) tem como foco principal a investigação da produção de biopolímeros, especialmente a xantana, utilizando a água produzida de poços de petróleo e diversas combinações de nutrientes, incluindo a glicerina bruta. Este trabalho, em inglês, está reproduzido na íntegra no Apêndice G - Trabalho sendo preparado para submissão em periódico a ser escolhido.

A xantana é um polissacarídeo produzido a partir de carboidratos, pela bactéria do gênero *Xanthomonas*, e tem grande valor comercial devido às suas propriedades, especialmente a de formar soluções viscosas mesmo em baixas concentrações. A xantana tem uso na indústria alimentícia, farmacêutica, e petroquímica, assim como em MEOR. O presente trabalho avaliou o uso da água produzida de dois poços de petróleo e uma mistura de glicerina bruta e sacarose como meio de produção da goma xantana. Foram obtidas uma produção de 8,31 e 8,95 gL⁻¹ de xantana, com viscosidades de 92 e 492 cP, com a água produzida dos poços A e B, respectivamente. Análises estatísticas mostraram que a sacarose foi responsável pela variação na produção da xantana. A interação da sacarose com a glicerina influenciou significativamente a produção de xantana. A espectroscopia de absorção infravermelha mostrou que ambas as gomas têm uma estrutura molecular semelhante à da goma xantana comercial. Esse processo tem produzido uma goma xantana de boa qualidade para usos na indústria do petróleo, em aplicações de MEOR, a custos mais baixos que os dos processos convencionais.

Algumas conclusões significativas podem ser destacadas:

- É possível produzir a goma xantana com *Xanthomonas campestris* em água produzida de campos de petróleo em meio de produção suplementado com sacarose e glicerina bruta;
- A fonte de carbono suplementar exigida varia de acordo com o tipo de água produzida;
- A viscosidade aparente da xantana produzida é boa;
- A xantana apresentou propriedades reológicas pseudoplásticas, características de soluções microbianas de polissacarídeos;
- O espectro infravermelho da goma xantana obtida com água produzida com 2% de glicerina bruta foi bastante semelhante ao da goma comercial;
- Não há registro, na literatura, da produção de goma xantana a partir de resíduos da indústria do petróleo (água produzida), nem com a linha de produção utilizada neste trabalho. Tanto a glicerina pura como a bruta tem sido utilizada, por outros pesquisadores, como substrato para a produção de goma xantana, mas não há registro da produtividade obtida.

4.3 Descrição de Algumas das Técnicas de MEOR

Algumas técnicas de MEOR apresentam mais potencial do que outras, de se transformarem em ferramentas de largo uso na indústria de petróleo, seja por sua facilidade de aplicação ou por seu potencial de recuperação de valores adicionais.

Como os processos biológicos realizados pelos micro-organismos empregados em qualquer técnica de MEOR são muito complexos e não ocorrem absolutamente isoladamente, naturalmente, muitas das experiências que visam estudar um ou outro mecanismo de uma determinada técnica, acabam envolvendo outros processos e mecanismos de atuação. Frequentemente, esses processos agem em conjunto, e mesmo as técnicas consideradas como tendo um objetivo específico, como, por exemplo, o de produzir biopolímeros, têm efeitos colaterais causados por outros produtos microbianos produzidos concomitantemente, tais como surfatantes, e outros metabólitos microbianos. Muitas vezes esses mecanismos são complementares, ajudando a alcançar resultados mais positivos,

mas pode ocorrer o contrário, quando alguns mecanismos agem de forma contrária aos objetivos de outros mecanismos; infelizmente, pode ser difícil separar as causas dos resultados observados.

Também foram pensadas as limitações técnicas ou práticas que impedem o uso ou a aplicação das técnicas de MEOR, buscando formas de superar essas limitações. Desde os primeiros ensaios com as técnicas de MEOR, os nutrientes mais utilizados foram açúcar, melaço de cana de açúcar, e produtos semelhantes, pois representam fontes de carbono geralmente facilmente utilizadas pelos micro-organismos. As quantidades geralmente empregadas chegam até a 5% da água utilizada para injeção. Mas considerando os volumes de água injetada dos grandes campos *offshore*, por exemplo, esse percentual de tais produtos seria impraticável, pois poderia representar milhares de toneladas de açúcar diariamente, em alguns casos. Isso tornaria inviáveis as técnicas de MEOR que dependem da injeção desses nutrientes. Logo cedo no desenvolvimento das técnicas de MEOR foi percebido que o uso de parte do próprio óleo do reservatório deveria servir como a maior parte da fonte de carbono utilizada pelos micro-organismos atuantes nas técnicas empregadas, sendo apenas complementados com micronutrientes essenciais (tipicamente minerais traço e outros compostos essenciais, porém dificilmente sintetizados autonomamente, em quantidades suficientes) ou outros produtos (SUNDE et al., 1992). Estudos especificamente direcionados para o melhor entendimento do uso do óleo residual como fonte de carbono para os micro-organismos empregados nas técnicas de MEOR também foram propostos (BREALEY, 2003b).

Outro foco dos estudos sobre as técnicas de MEOR passou a ser os metabólitos produzidos pelos micro-organismos, e seu papel nos processos que ocorrem dentro dos reservatórios. Dessa forma, os biopolímeros, os biossurfatantes, e outros produtos que desempenham papéis chave em diversas técnicas de MEOR, foram estudados a fundo, isoladamente, como produtos químicos de origem biológica, ou como parte do diferencial de diversos tipos de micro-organismos que poderiam ser selecionados para aplicação de técnicas de MEOR.

A seguir, são abordados e discutidos estudos relativos a diversas dessas técnicas. O objetivo é estabelecer uma visão e compreensão mais ampla dos tipos de técnicas de MEOR que estão sendo estudadas, mas também gerar uma base

para poder avaliar as perspectivas de cada uma, tanto no cenário internacional da indústria de petróleo, como no cenário nacional brasileiro.

4.3.1 Biorremediação

Há muito tempo a biotecnologia já é amplamente utilizada na indústria do petróleo, na área de remediação de solos contaminados com hidrocarbonetos, e no tratamento de efluentes de diversos processos. Técnicas de identificação e de avaliação do potencial de degradação de determinados micro-organismos também estão avançadas (CHAILLAN et al., 2004), permitindo associar certas cepas ou misturas, a problemas de contaminação por compostos específicos. Projetos em que o autor participou ativamente, no Brasil, no Uruguai e em outros países, têm demonstrado que a bioaugmentação, com misturas de cepas especialmente selecionadas para degradar compostos de hidrocarbonetos, permitiu uma redução do tempo para atingir níveis aceitáveis de descontaminação em áreas de *landfarming* e em costas rochosas, assim como uma aceleração da quantidade de resíduos degradados de até uma ordem de magnitude (BIO-SYSTEMS CORPORATION, 1997).

A remediação de áreas contaminadas através da bioestimulação e bioaugmentação permitiu evitar os danos causados à fauna e à flora por métodos intensivos e agressivos, como o jateamento com água ou vapor, ou outras medidas tecnologicamente complexas e onerosas (VENOSA e CHU, 2003).

O tratamento biológico da água produzida, contaminada com hidrocarbonetos, durante a produção de petróleo, tornou-se uma exigência ambiental comum, e apresenta vantagens significativas na redução da carga orgânica (DQO e DBO) e na remoção de sólidos suspensos (LI, KANG, CHANG, 2005), principalmente através do processo de desemulsificação realizada por enzimas exsudadas por micro-organismos. No sentido em que as restrições sobre o descarte de água produzida poderiam limitar a produção de certos campos petrolíferos em áreas ambientalmente sensíveis, as técnicas de tratamento biológico dessa água representam exemplos de técnicas biológicas que permitiram ampliar a produção de óleo.

Da mesma forma, no sentido em que a biorremediação de áreas contaminadas com resíduos oleosos pode viabilizar a produção de petróleo, ou permitir seu aumento, em áreas ambientalmente sensíveis, a utilização da biorremediação também pode ser considerada como uma técnica de MEOR, mas assim como o tratamento biológico de efluentes, geralmente é tratada como uma técnica ambiental, de mitigação ou recuperação de danos ou passivos ambientais. Mas estes exemplos, e outros, sugerem para vários pesquisadores as analogias conceituais que servem de base para o uso de técnicas biológicas em aplicações inovadoras na indústria do petróleo, e especificamente em aplicações de MEOR.

4.3.2 Produção de Biopolímeros

Desde os primórdios dos métodos de EOR que utilizavam a injeção de polímeros nas formações produtoras, o principal mecanismo para alcançar o aumento da produção foi a modificação do perfil de permeabilidade dessas rochas, pelo entupimento seletivo e intencional de poros através dos quais a água injetada para estimular a produção de óleo passava, sem realizar um varrido adequado. Nas técnicas de MEOR envolvendo a produção de biopolímeros, o mesmo princípio foi adotado, também visando a modificação do perfil de permeabilidade da rocha do reservatório. Nesse caso, a técnica é chamada de MFD, pois a água injetada é redirecionada para realizar um varrido mais eficaz. Como no caso de EOR, as técnicas de MFD também são chamadas de técnicas de modificação microbiana do perfil de permeabilidade (MPPM – *microbial permeability profile modification*) da rocha do reservatório.

4.3.2.1 MFD - *Microbial Flow Diversion*

Entre os exemplos mais bem sucedidos de técnicas de MEOR estão técnicas microbianas que buscaram redirecionar a varredura da água injetada. Quando a água injetada flui por caminhos preferenciais ela deixa de realizar a varredura do

óleo de maneira eficaz. A água simplesmente não chega onde está o óleo, para poder deslocar o óleo de onde está preso nas rochas do reservatório. A modificação das características hidráulicas de meios porosos, especialmente desses caminhos preferenciais, através de efeitos biológicos, como o crescimento de micro-organismos e bioflocos, além da produção de biopolímeros, permite a aplicação dirigida deste efeito para potencializar as técnicas de injeção de água, usadas para facilitar o escoamento do petróleo de rochas pouco permeáveis (ROCKHOLD et al., 2002).

Seletivamente entupindo esses caminhos preferenciais, a água injetada passa a fluir por outros caminhos, realizando uma melhor varredura do óleo. Tanto os micro-organismos introduzidos no reservatório, cujo crescimento se dá na forma de bioflocos (massa biológica), como os biopolímeros produzidos *in situ* por esses micro-organismos, podem realizar o entupimento seletivo de poros nas rochas de reservatórios, por onde a água injetada se perde pelos caminhos preferenciais. O resultado é a redução da vazão da água injetada que flui pelos caminhos preferenciais, caminhos esses por onde a água não atinge o objetivo de varrer o óleo das rochas do reservatório. A modificação da permeabilidade de certas zonas (obstrução dos caminhos preferenciais) permite a produção de óleo de regiões previamente não acessíveis, aumentando o fator de recuperação.

O efeito do redirecionamento da varredura da água injetada (*microbial flow diversion* – MFD) foi descrito há bastante tempo por diversos autores (STEPHENS, BROWN, VADIE, 1999; STEPHENS, BROWN, VADIE, 2000), e hoje se constitui numa técnica de MEOR consagrada, pois realiza os mesmos efeitos que se busca obter com as técnicas de recuperação avançada que empregam a injeção de polímeros produzidos *ex situ*, geralmente por processos químicos. O departamento de energia (DOE) dos EUA desenvolveu um simulador para modelar o comportamento de micro-organismos introduzidos (crescimento de bioflocos) em campos produtivos, e outros simuladores de transporte microbiano (MTS - *Microbial Transport Simulator*) se seguiram, como o STARS (COMPUTER MODELLING GROUP LTD., 2005; BREALEY, 2003a). Estudos recentes continuam buscando melhorar ainda mais a eficiência da injeção de água com MFD, e estas aplicações de MEOR são cada vez mais comuns (OKLAHOMA UNIVERSITY, 2005).

As técnicas de obstrução seletiva de poros nas rochas de reservatórios visavam alcançar esse objetivo através da formação de bioflocos e biofilmes, e pela

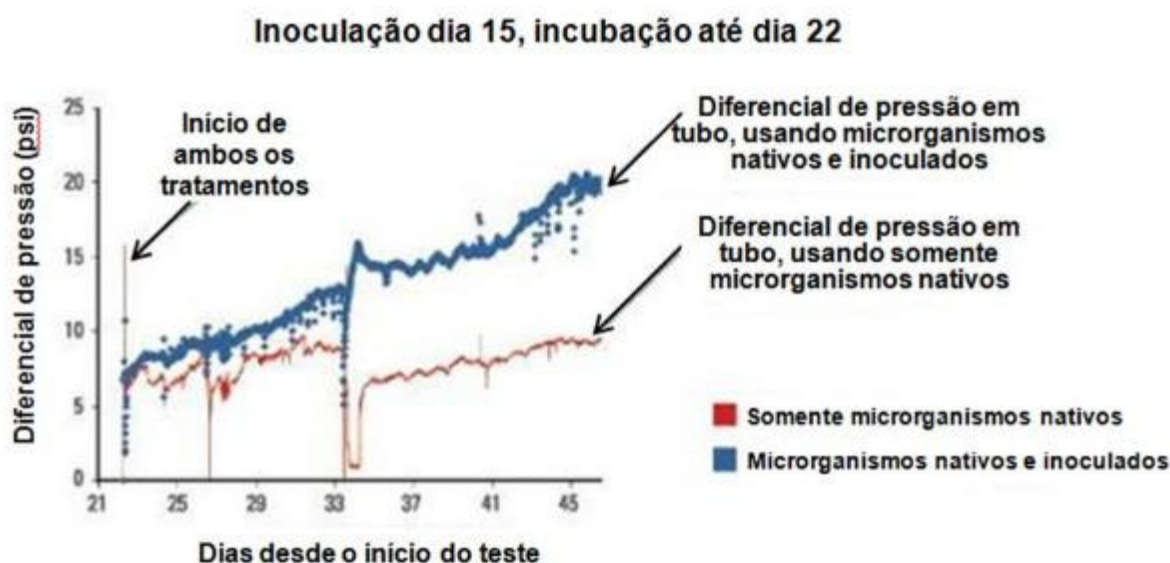
produção de metabólitos, como os biopolímeros e outros compostos produzidos. Para isso, foram empregadas duas abordagens – técnicas de bioestimulação (injeção somente de nutrientes para estimular o crescimento de micro-organismos nativos) e de bioaugmentação (injeção de micro-organismos em si, ou de micro-organismos e nutrientes, para aumentar a população microbiana desejável). Entre as experiências utilizando a primeira abordagem, estão várias que utilizaram nutrientes simples (N-P-K) com diversas formas de injeção, para atingir o objetivo de estimular o crescimento microbiano (PAULSEN et al., 1994; JENNEMAN, MOFFITT, YOUNG, 1996; VADIE, STEPHENS, BROWN, 1996; STEPHENS, BROWN, VADIE, 2000; BROWN et al., 2002; BAO et al., 2009; e outros), enquanto outros pesquisadores adotaram a abordagem da seleção de micro-organismos mais adequados, para realizar sua injeção diretamente nos reservatórios (PORTWOOD e HIEBERT, 1992; SUGAI et al., 1999; NAGASE et al., 2001; SHI et al., 2003; STRAPPA et al., 2004; BAE, CHAMBERS, LEE, 2006; WILDENSCHILD, 2012; e outros). Como essa técnica é uma das mais antigas técnicas de MEOR desenvolvidas, e uma das que tem tido mais êxito, é natural que muitas experiências tenham sido relatadas na literatura. Adicionalmente, muitas dessas experiências também relataram outros efeitos, além da produção de biopolímeros, que geralmente foram considerados complementares, ou seja, ajudaram a obter os resultados positivos esperados, como os efeitos da produção concomitante de biosurfatantes.

Apesar do sucesso das técnicas de MFD, também chamadas de técnicas de modificação microbiana do perfil de permeabilidade (MPPM – *microbial permeability profile modification*) da rocha do reservatório, esses estudos continuam tentando entender, em nível celular e molecular, como os micro-organismos agem, quais produtos são os mais eficazes no bloqueio dos poros ao longo dos caminhos preferenciais na rocha, e como esse bloqueio se dá. Os mecanismos não envolvem uma produção maciça de bioflocos, biofilmes e biopolímeros que preenchem as gargantas e poros da rocha, como poderia funcionar o mecanismo de entupimento esperado. Na realidade, o mecanismo funciona pela formação de um emaranhado desses elementos, que em conjunto, e mesmo sem criar quantidades equivalentes aos espaços vazios, configurando, assim, uma eficiência biológica favorável, conseguem impedir o fluxo de água, e até do CO₂ injetado, melhorando o varrido do óleo nas outras regiões do reservatório (SCHMITZ et al., 2008; NETL, 2011).

Empresas gigantes do setor químico, como a DuPont, por exemplo, já identificaram que algumas técnicas de MEOR representam um importante ramo de atuação para elas, demonstrando que essas técnicas não se restringem a oportunidades oferecidas por um nicho de mercado bem restrito, pois essas empresas não têm foco em tais nichos pequenos de atuação. Sua divisão de soluções sustentáveis para a indústria da energia (DuPont Sustainable Solutions) tem apostado em técnicas de MEOR que oferecem produtos microbianos e serviços acoplados, para melhorar a eficácia do varrido da água injetada para melhorar a produção de óleo (DUPONT, 2013). A abordagem dessa empresa multinacional envolve a apresentação dessa técnica, relativamente consagrada e bem dominada, dentre as técnicas de MEOR, como uma solução com marca própria (MATRx™ EOR), e com o respaldo e a credibilidade que seu nome pode proporcionar a tais produtos. Como parte de sua estratégia de marketing e diferenciação de seus produtos, ela também apresenta o mecanismo funcional dessa técnica de MEOR com a descrição de *flow conformance*, apesar de que já há uma terminologia amplamente aceita na indústria de petróleo e gás, para esse mecanismo, como “modificação do perfil de permeabilidade do reservatório”, “redirecionamento de varredura da água injetada”, “MFD”, etc. *Flow conformance* sugere uma conformação do fluxo, ou seja, uma adequação do fluxo da água injetada ao fluxo desejado, em vez daquele comportamento que passou a existir no reservatório.

A DuPont oferece grande credibilidade apenas com a chancela do seu nome, mas também apresenta experiências que quantificam os resultados obtidos com a aplicação de sua técnica de MFD, que emprega uma mistura própria de micro-organismos que obstruem os poros da rocha do reservatório, além dos micro-organismos presentes na água de injeção. Em uma de suas aplicações, a técnica empregada resultou em um significativo aumento do diferencial de pressão da água injetada, demonstrando que a injeção de seu produto contendo micro-organismos nativos e inoculados devolveu as características almejadas para o sistema de injeção de água (Figura 28). O perfil de permeabilidade do reservatório foi melhorado, e foi calculado um custo aproximado de US\$10 por barril de óleo adicional recuperado (JACKSON e FISHER, 2013).

Figura 28 – Resultados da injeção de um produto da DuPont, contendo micro-organismos nativos e inoculados, no sistema de injeção de água de um reservatório

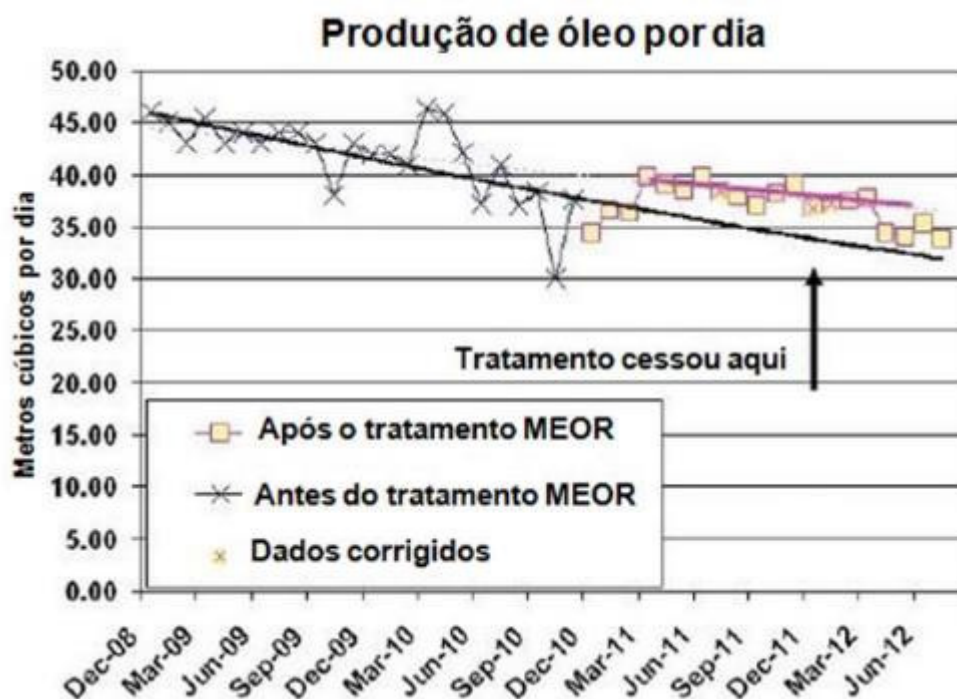


Nota: Um aumento do diferencial de pressão indica que o perfil de permeabilidade foi modificado, permitindo varrer melhor o óleo residual.

Fonte: Adaptado de JACKSON e FISHER, 2013.

Esses resultados também sugerem que a bioaugmentação, com a introdução de micro-organismos que antes não estavam presentes no reservatório, tem significativa vantagem sobre a bioestimulação, onde apenas os micro-organismos nativos e nutrientes são utilizados. Essa é uma conclusão importante, pois muitos pesquisadores buscam refutar o benefício da injeção de micro-organismos não nativos, apesar de que em muitas aplicações de bioaugmentação ficou claro o diferencial do desempenho alcançado com a introdução de micro-organismos não nativos, como a própria experiência do autor tem demonstrado, em aplicações da bioaugmentação na biorremediação e no tratamento de efluentes. Os resultados também sugerem que os efeitos da aplicação da técnica de MFD podem tardar até alguns meses para serem sentidos, mas podem perdurar por vários meses após o término da aplicação (Figura 29). Nesse caso, o protocolo de tratamento envolveu a inoculação periódica, uma ou duas vezes ao ano, e a adição de nutrientes com mais frequência, aproximadamente mensalmente. Diversas vantagens ambientais e operacionais também foram observadas, com a técnica de MEOR, em relação ao que seria esperado para a aplicação de um método de EOR envolvendo a injeção de polímeros para obstruir os caminhos preferenciais que prejudicavam o desempenho do sistema de injeção de água (JACKSON e FISHER, 2013).

Figura 29 - Resultados de um tratamento com a técnica de MFD



Nota: São mostrados efeitos residuais significativos, mesmo após vários meses de cessado o tratamento.

Fonte: Adaptado de JACKSON e FISHER, 2013.

4.3.2.2 Biopolímeros para Uso em EOR

Tanto as técnicas de EOR envolvendo a injeção de polímeros químicos, quanto as técnicas de MEOR envolvendo a estimulação ou a bioaugmentação para produzir biopolímeros (e outros produtos microbianos), têm tido bastante êxito em alcançar seus objetivos de obstruir caminhos preferenciais na rocha reservatório e melhorar o varrido da água injetada, para estimular a produção de óleo. Hoje, a injeção de biopolímeros produzidos *ex situ*, por processos microbiológicos, também passou a ser considerada uma técnica de MEOR. Apesar dessa técnica não envolver nem a injeção direta de micro-organismos nem a bioestimulação de populações microbianas nativas, os biopolímeros injetados são produzidos por meios estritamente baseados na seleção de linhagens de micro-organismos eficientes na produção de biopolímeros de alto desempenho (como a goma xantana, por exemplo), e do controle das condições de crescimento, desenvolvimento e produção dos metabólitos microbianos. O foco das pesquisas atuais sobre essas

técnicas são os processos de produção dos biopolímeros, tanto das instalações, como dos micro-organismos empregados e dos biopolímeros produzidos. Esse foi justamente o foco dos trabalhos descritos acima, sobre a produção microbiana de xantana. A xantana é um biossurfatante de alto desempenho, produzido por métodos cada vez mais eficazes, mas ainda assim, totalmente dependentes de processos microbianos para sua produção, como, por exemplo, pelas bactérias do gênero *Xanthomonas*.

Segundo informações da Petrobras, cujos detalhes foram discutidos confidencialmente com o autor, em um campo não identificado na Bacia de Sergipe-Alagoas, a Petrobras tem desenvolvido testes de longa duração (quase dois anos), com técnicas de MEOR voltadas para a produção de biopolímeros. Segundo essas mesmas fontes, nesses testes em grande escala, envolvendo todo um campo, e não apenas um ou outro poço, um sistema abrangente foi desenvolvido para produzir biopolímeros próximo aos poços de injeção, em unidades autônomas de produção, e realizar a injeção em vários poços injetores; o sistema contou, ainda, com diversos poços produtores, para estudar os resultados da técnica de modificação do perfil de permeabilidade, através da injeção de biopolímeros (produzidos por unidades de produção biológica). Os resultados foram avaliados como muito positivos (PETROBRAS, 2012).

4.3.2.3 Reparo de Danos Causados pela Injeção de Polímeros

Os métodos de EOR que envolvem a injeção de polímeros químicos em reservatórios estão sujeitos a problemas, pois os mesmos polímeros que devem realizar tarefas benéficas para estimular a produção do poço ou campo, também podem causar danos às formações onde são injetados. Esse é o caso, por exemplo, quando o fraturamento hidráulico é feito para estimular a produção de formações com baixa permeabilidade; além de água e propantes, muitas vezes diversos produtos químicos também são usados concomitantemente, cada um visando um objetivo diferente mas complementar. Dada a complexidade das interações físicas e químicas entre esses produtos e as formações, não é de estranhar que muitas vezes essas intervenções acabam por criar problemas ainda mais sérios do que as

condições originais. O resultado mais frequente é o abandono desses poços onde danos à formação ocorreram.

Em alguns desses casos, as técnicas de MEOR se mostraram eficazes no reparo dos danos causados pelos produtos químicos injetados, especialmente pelos polímeros. Uma combinação de mecanismos de degradação microbiológica desses polímeros, ou de produção de biossurfactantes e outros compostos que permitiram desobstruir os poros da rocha que estavam bloqueados, resultou na redução ou completa reparação dos danos causados. Apesar da capacidade das técnicas de MEOR de alcançar objetivos relativamente complexos e de difícil execução, novas e variadas formas de aplicação dessas técnicas continuam adicionando experiências bem-sucedidas ao rol de usos dessas ferramentas no campo. A chave para seu sucesso está na compreensão dos mecanismos que poderão agir para combater condições específicas encontradas nos reservatórios tratados. Mas o grande sucesso nesses casos, com reversão dos danos e aumento de produção de até 40% sobre a vazão pré-danos, reforça a inclusão das técnicas de MEOR no *toolbox* (conjunto de ferramentas disponíveis aos operadores) que as operadoras dispõem para combater os diversos tipos de problemas que podem surgir nos campos petrolíferos (BAILEY e ATNIP, 2001).

4.3.3 Controle da Biocorrosão

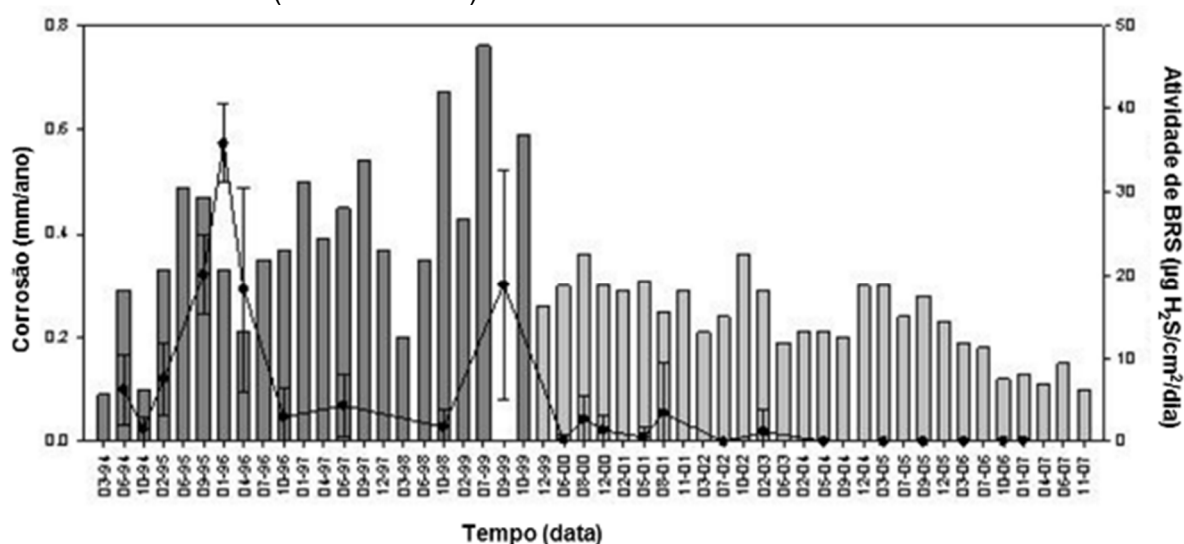
Em muitos campos petrolíferos *offshore*, a injeção de água é frequentemente empregada como uma das medidas para manter ou aumentar a produção de óleo. A água do mar é geralmente utilizada para esse fim, pois está disponível e é abundante. A água do mar, porém, é rica em sulfatos, e estimula o crescimento acelerado de BRS presentes nos sistemas de produção e nos reservatórios, induzindo elevadas taxas de MIC, pela produção de H₂S durante a respiração anaeróbica, além de representar sérios riscos à saúde dos operadores dessas instalações, e ao meio ambiente. Adicionalmente, o H₂S produzido pode reagir com átomos de ferro, presentes nas ligas metálicas, produzindo sulfeto de ferro, que forma uma crosta nas superfícies metálicas, como as das tubulações, por exemplo, comprometendo o fluxo e dificultando ainda mais a efetividade de medidas contra as

BRS, pois estas ficam protegidas por essa crosta (ANCHLIYA, 2006). Outros processos de corrosão também estão relacionados, como a corrosão causada por rachaduras induzidas pela formação de hidrogênio (HIC - *Hydrogen Induced Cracking*).

4.3.3.1 Injeção de Nitrato como Tratamento Biológico

O tratamento com nitrato é considerado uma técnica de MEOR para o controle da biocorrosão, pois está baseado na criação artificial de condições que favorecem a atividade microbiana de bactérias redutoras de nitrato (BRN, ou NRB – *nitrate reducing bacteria*), em detrimento das BRS. Diversas experiências bem sucedidas têm sido relatadas, especialmente no Mar do Norte, onde a injeção de nitrato resultou na redução da biocorrosão em até 40% (Figura 30), quando comparado com o tratamento padrão, realizado anteriormente, com biocidas (CIPR, 2013).

Figura 30 – Histórico das taxas de corrosão e atividade microbiana no campo de Gullfaks (Mar do Norte)

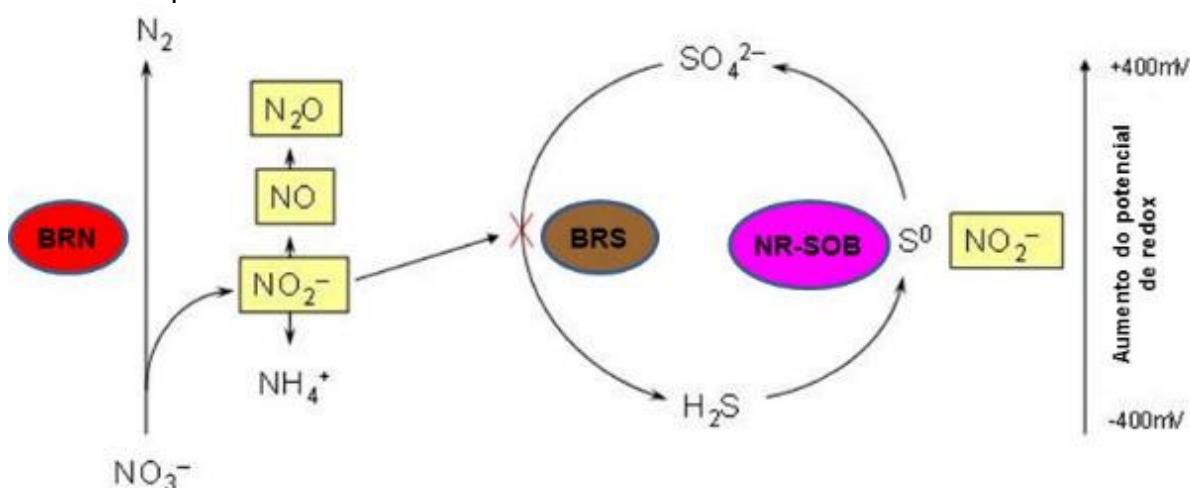


Legenda: No eixo à esquerda é mostrada a taxa de corrosão no sistema de injeção de água, durante tratamento com biocida (barras escuras) e nitrato (barras claras). Os círculos preenchidos mostram a atividade de BRS (eixo à direita).

Fonte: Modificado de CIPR, 2013.

Os mecanismos atuantes nessa técnica são as BRN, que podem inibir a atividade das BRS através de diversos processos. Os principais são a produção e acumulação de nitrito (NO_2^-), produto resultante de sua atividade metabólica, e que é altamente tóxico para as BRS; e estabelecimento de condições adversas para o crescimento de BRS devido ao aumento do potencial de redox. Neste último caso, essas condições adversas são estabelecidas através de processos biológicos de oxidação de sulfetos pelos agentes microbiológicos chamados de bactérias redutoras de nitrato e oxidantes de sulfeto (NR-SOB – *Nitrate Reducing-Sulfide-Oxidizing Bacteria*). Essa técnica foi utilizada nos campos de Veslefrikk e Gullfaks, no Mar do Norte, desde 1999 (CIPR, 2013). Esses mecanismos estão ilustrados na Figura 31.

Figura 31 – Descrição dos possíveis mecanismos operantes na técnica de MEOR que utiliza o nitrato como forma de inibir o crescimento de BRS



Nota: As BRN produzem nitrito e produtos intermediários (em amarelo), que inibem as BRS, e as NR-SOB aumentam o potencial de redox e oxidam o H_2S .

Fonte: Modificado de CIPR, 2013.

A chave para o sucesso da técnica de MEOR com injeção de nitrato é a estimulação do crescimento biocompetitivo por micro-organismos (BRN) que utilizam o mesmo substrato para seu crescimento, que os micro-organismos associados à biocorrusão (BRS). Como as condições de reservatório geralmente envolvem temperaturas elevadas, a técnica tem melhor sucesso e desempenho quando existem (ou são introduzidas) linhagens termofílicas de BRN que podem concorrer com vantagem competitiva sobre as BRS nativas, ou aquelas introduzidas pelas intervenções nos poços (SUNDE et al., 2004).

Apesar das experiências de sucesso com tratamentos com nitrato, é importante lembrar que o nitrato também pode ser um forte agente causador da corrosão, portanto esses tratamentos envolvem um risco de causar, ou até piorar, as condições que favorecem a corrosão (NEMATI, JENNEMAN, VOORDUOW, 2001; LEFERINK e HUIJBREGETS, 2002). Por esse motivo, muitos pesquisadores têm voltado sua atenção para tratamentos alternativos para inibir as BRS, que não dependem apenas da adição de nitrato, mas buscam alavancar os efeitos inibidores de outros agentes, como no caso das iniciativas do trabalho preparado para publicação, descrito acima (“Development and Application of the Biocompetitive Exclusion Technology in the Control of Biogenic Sulfide in the Oil Industry”).

4.3.3.2 Monitoramento Microbiológico como Medida de Controle da Biocorrosão

Como a MIC é um processo de origem microbiológica, o controle das populações microbianas envolvidas é fundamental para prever o surgimento de problemas causados pela presença ou crescimento de BRS. Portanto, é essencial poder realizar um monitoramento quase em tempo real, da presença de micro-organismos que poderiam ser agentes da produção de H₂S. Mas esse monitoramento é impossível com as técnicas de identificação e contagem baseadas na cultura dos micro-organismos encontrados em amostras obtidas no campo, durante operações de perfuração ou produção.

Os métodos microbiológicos baseados em coleta e cultura de micro-organismos no campo sempre apresentaram dificuldades de execução, demora, e incerteza nos resultados, pois as próprias técnicas de cultivo podem afetar as características das populações microbiológicas nativas, e assim, influenciar os resultados. Novas tecnologias, como FISH, têm sido aplicadas diretamente em amostras, trazendo vantagens importantes no monitoramento em tempo real das populações microbianas. Dessa forma, o surgimento de populações microbianas específicas (que geram condições propícias à corrosão) podem ser identificadas, permitindo agir rapidamente e iniciar tratamentos adequados, baseado em uma contagem confiável de determinados micro-organismos, como BRS (SKOVHUS et al., 2009).

Desde 2009, o Danish Technological Institute utiliza o método FISH para monitorar os níveis de micro-organismos potencialmente perigosos para a formação de H₂S, em instalações petrolíferas no Mar do Norte. Essa é uma estratégia que envolve o uso de ferramentas inovadoras, incluindo as ferramentas genéticas mais avançadas, para realizar a prevenção e o controle dos problemas da corrosão em instalações *offshore* (DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE, 2013).

4.3.3.3 Exclusão Biocompetitiva de BRS

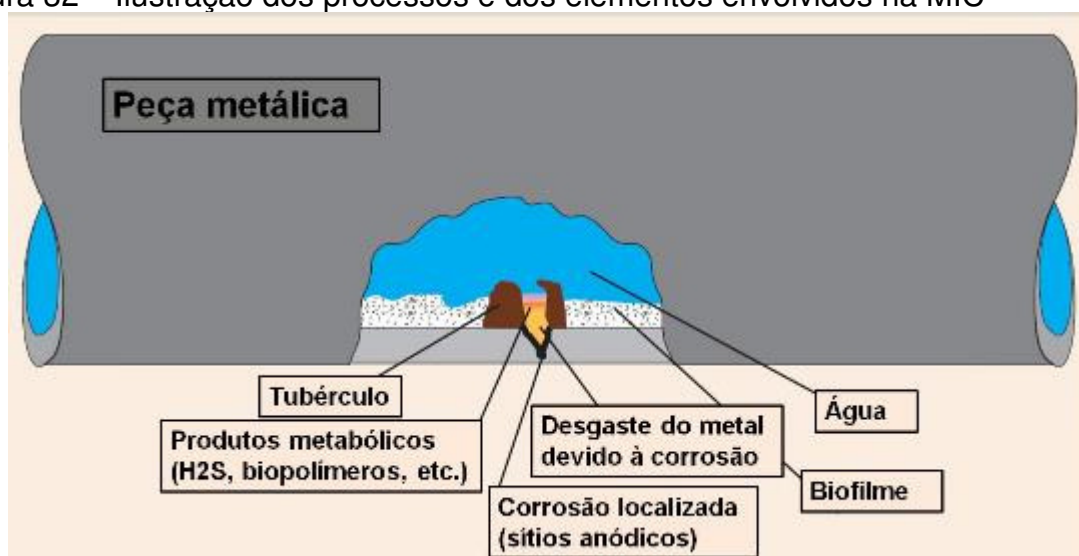
A geração de gás sulfídrico, ou sulfeto de hidrogênio, (H₂S) por BRS é um problema da indústria do petróleo e gás em todo o mundo, conhecido como *souring* (acidificação microbiana por produção de H₂S) ou biosulfetogênese. Como o problema, além dos riscos à saúde e ao meio ambiente, pode prejudicar a produção de petróleo e gás por comprometimento da integridade dos equipamentos e instalações de produção devido à corrosão, métodos que visam seu controle se enquadram como técnicas de EOR, e quando esses métodos envolvem o uso de micro-organismos ou processos microbiológicos, eles são considerados como sendo técnicas de MEOR.

Os custos envolvidos com a corrosão metálica são bilionários (US\$276 bilhões nos EUA, US\$15 bilhões no Brasil), e grande parte desses custos envolvem a MIC. Tipicamente são usados tratamentos com biocidas na tentativa de eliminar as BRS que causam o problema, mas elevados custos e baixo desempenho têm sido um grande desafio para a indústria, especialmente pelo surgimento de micro-organismos resistentes aos biocidas empregados. Também são usados nitrito, nitrato e/ou molibdato, inibidores das BRS (CARVALHO et al., 2013).

A tecnologia de exclusão biocompetitiva de BRS (TEB) é um exemplo clássico da aplicação dos princípios da microbiologia para modificar as condições que levam à corrosão induzida microbiologicamente (MIC). Os princípios em questão envolvem a competição por recursos durante o desenvolvimento de colônias de micro-organismos; as diferentes atividades metabólicas (bioquímicas) de determinados micro-organismos; e agentes químicos que favorecem ou inibem o desenvolvimento de diferentes linhagens, que por sua vez realizam diferentes processos bioquímicos.

As BRS se desenvolvem em biofilmes resistentes, e sua atividade metabólica reduz os sulfatos presentes, produzindo H_2S , assim como pode resultar na geração de ácido sulfúrico (forte agente corrosivo) pela oxidação de H_2S . Também formam estruturas macroscópicas (tubérculos), típicas da MIC em superfícies metálicas (Figura 32). Os tubérculos abrigam um conjunto simbiótico de colônias de bactérias, que uma vez instalado pode sobreviver em diversos ambientes e ao ataque de agentes químicos e mecânicos, pois umas podem fornecer nutrientes e abrigo para as outras, e os próprios tubérculos permitem a formação de colônias protegidas do ambiente exterior (MTI, 2010).

Figura 32 – Ilustração dos processos e dos elementos envolvidos na MIC



Fonte: adaptado de MDE Inc., 2013.

O controle da biossulfetogênese com a TEB envolve a adição de análogos de sulfato à água de injeção, que por sua vez favorece o crescimento de bactérias denominadas petrobióticas (bactérias desnitrificantes, bactérias redutoras de análogos de sulfato, e/ou bactérias oxidantes de enxofre), em detrimento das BRS. O balanço termodinâmico favorece a redução do nitrato em relação à redução do sulfato, portanto na presença de nitrato as bactérias petrobióticas têm vantagem no seu desenvolvimento, em relação às BRS, e o aumento da população de bactérias petrobióticas causa maior consumo de fontes de carbono, o que inviabiliza sua disponibilidade para as BRS. As medidas que estimulem o desenvolvimento de BRN, ou das BRS dos gêneros *Desulfovibrio*, *Desulfobulbus* e *Desulfomonas*, que também podem reduzir nitrato (para amônia), resultam na inibição dos processos que levam

à produção de H₂S. Esse conjunto de medidas compõe a base da tecnologia de MEOR conhecida como TEB (ALMEIDA et al., 2006).

4.3.4 Produção de Biossurfatantes

Surfatantes foram sugeridos como possíveis agentes para estimular a melhor recuperação do petróleo de poços com problemas de vazão, dada a experiência sobre o efeito de surfatantes na redução da viscosidade de compostos semelhantes. Em geral, a introdução de surfatantes permite que duas substâncias que não se misturam espontaneamente possam ter contato interfacial maior, formando emulsões e dando lugar a reações mais intensas entre elas ou entre os agentes que agem sobre elas.

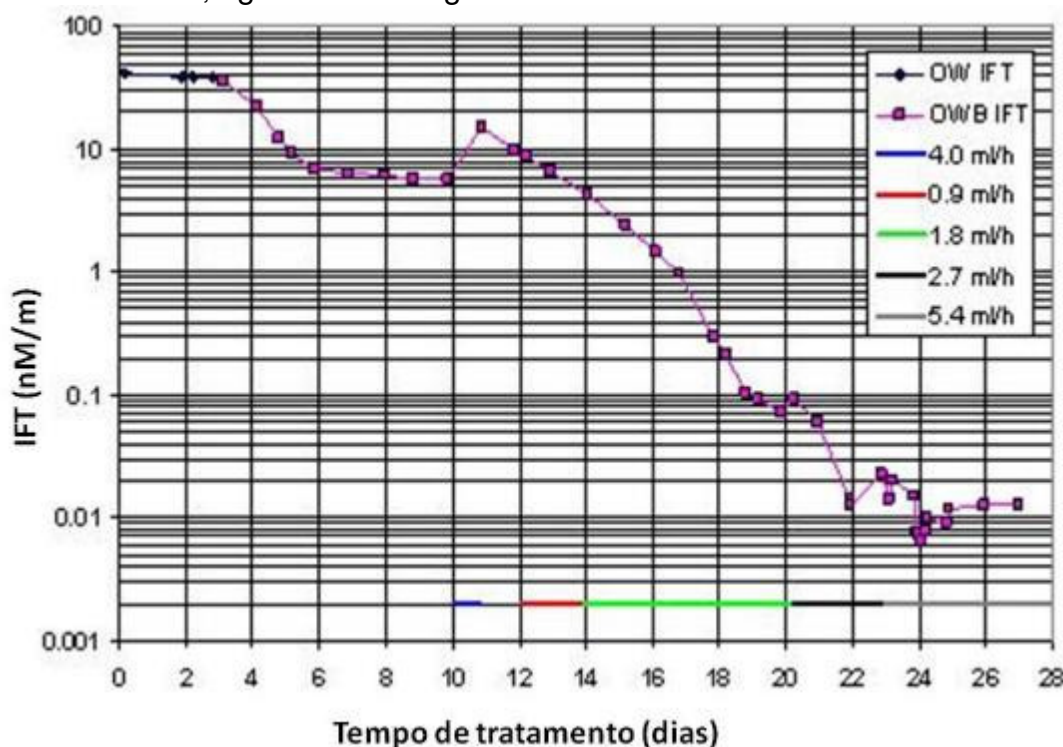
Desde os anos 1990 já se entendia o possível benefício da produção de biossurfatantes, para mobilizar o óleo que não pode ser produzido de outras formas. Foram estudados os micro-organismos que produzem tais compostos, em reservatórios petrolíferos, e os fatores que limitam sua produção de biossurfatante, apesar de que já se sabia que essa produção não está associada ao crescimento microbiano em si, mas a fatores de estresse, que estimulam essa produção (HOMMEL, 1990). A detecção da produção de biossurfatantes por diferentes micro-organismos, em nível molecular, também é difícil, e representa um desafio para os primeiros passos de uma investigação sobre a produção de biossurfatantes; estudos sobre ferramentas que auxiliam nesses esforços têm sido importantes para facilitar tais investigações (YOUSSEF et al., 2004).

Após anos de estudos sobre biossurfatantes e os micro-organismos e condições mais eficazes para sua produção, a indústria petrolífera reconhece que as técnicas de MEOR envolvendo a produção microbiana de biossurfatantes representam uma forma eficaz de conseguir alterar as propriedades dos óleos pesados de um reservatório, com princípios operantes bem compreendidos e resultados relativamente previsíveis e satisfatórios. Os biossurfatantes, produzidos por processos microbiológicos, mas não necessariamente produzidos *in situ* nos reservatórios onde serão empregados, apresentam um grande potencial de serem utilizados no lugar dos surfatantes químicos.

Outra forma de utilizar os biossurfatantes em técnicas de MEOR é através da possibilidade da emulsificação e desemulsificação biológica do petróleo. No transporte de petróleo em dutos, a emulsificação do petróleo poderia facilitar seu transporte, no caso de óleo pesado, que apresenta elevada viscosidade e problemas nessas tubulações. Posteriormente, a desemulsificação, também possivelmente mediada por processos microbiológicos, poderia facilitar a recuperação do óleo, através da separação das fases água e óleo da emulsão (NADARAJAH, SINGH, WARD, 2002; AL ROOMI et al., 2004).

De fato, os biossurfatantes conseguem uma redução da tensão interfacial entre a água e o óleo, devido ao crescimento microbiológico nessas interfaces, mesmo em se tratando de frações de óleo imiscíveis em água. Pesquisas realizadas, que mediram esse efeito, detectaram que o crescimento de micro-organismos na interface entre a água e o óleo resultou na redução dessa tensão interfacial para níveis inéditos de 0,006 nM/m (Figura 33). Uma redução da tensão interfacial para esses níveis, geralmente permite a mobilização do óleo aprisionado em um reservatório, de forma que possa ser produzido. No campo de Norne, no Mar da Noruega, água com teores elevados de oxigênio tem sido injetada juntamente com fosfato e nitrato, para estimular o crescimento de micro-organismos que produzem biossurfatantes. Também era esperado que o nitrato agisse como inibidor da biocorrção (KOWALEWSKI et al., 2005a). Até hoje, essa é uma experiência de referência para as técnicas de MEOR que envolvem o uso de biossurfatantes, e mesmo para MEOR em geral, pois foi a primeiro uso de MEOR para desenvolver um campo petrolífero desde que começou a produzir, sem esperar que os métodos de produção convencionais se esgotassem.

Figura 33 – Redução da tensão interfacial (IFT) observada em um sistema contendo óleo, água e micro-organismos



Legenda: É mostrada a tensão interfacial antes de injetar um consórcio microbiano (OW IFT), e depois (OWB IFT) dessa injeção. A incubação ocorre durante o número de dias mostrados no eixo horizontal.

Fonte: KOWALEWSKI et al., 2005b.

Hoje, a base do conhecimento em relação ao funcionamento dos biossurfatantes inclui um relativo domínio do entendimento de suas propriedades e dos processos produtivos de cada um, por diferentes linhagens de micro-organismos. Os biossurfatantes de baixa massa molecular são mais eficazes na redução da tensão superficial, enquanto os de alta massa molecular formam emulsões óleo água estáveis (CARA, 2009). Uma breve relação dos principais biossurfatantes e das respectivas linhagens de micro-organismos conhecidos como produtores pode ser vista na Tabela 3. Esse estado da arte, no entanto, não exaure nem de longe as possibilidades de conhecimento sobre diferentes micro-organismos produtores, sobre as condições ideais de produção, sobre os processos produtivos em si, ou sobre as formas de detectar quais biossurfatantes são produzidos em escala molecular, portanto estudos em relação às técnicas de MEOR que empregam biossurfatantes continuam trazendo grandes ganhos.

Tabela 3 – Classificação dos biossurfatantes segundo as linhagens dos diferentes micro-organismos produtores conhecidos

Classe	Biossurfatante	Microrganismo
Baixa Massa Molecular	Ramnolipídio	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Serratia rubidea</i>
	Trealolipídios	<i>Arthrobacter paraffineus</i> , <i>Rhodococcus erythropolis</i>
	Soforolipídios	<i>Candida lipolytica</i> , <i>Torulopsis bombicola</i>
	Celobioselipídios	<i>Ustilva maydis</i>
	Surfactina	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>B. papumilis</i>
	Fosfolipídios	<i>Acinetobacter</i> sp., <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>
	Lipopeptídios	<i>B. subtilis</i> , <i>B. papumilis</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>P. syringae</i> , <i>P. fluorescens</i>
	Flavolipídios	<i>Flavobacterium</i> sp.
	Gramicidina	<i>B. brevis</i>
Serrawetina	<i>Serratia marcescens</i>	
Alta Massa Molecular	Alasan	<i>Acinetobacter redioresistens</i>
	Emulsan	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>
	Biodispersan	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>
	Liposan	<i>Candida lipolytica</i>

Fonte: Adaptado de CARA, 2009.

A ação de biossurfatantes (surfatantes produzidos por micro-organismos introduzidos) apresentou bons resultados, especialmente, como era de se esperar, em petróleo pesado, permitindo que fluísse mais facilmente (BABADAGLI, 2003). A otimização das técnicas de MEOR, visando a produção de biossurfatantes, é o principal foco dos esforços do DOE, atualmente (US DOE, 2004; US DOE, 2005).

Iniciativas de P&D com técnicas da bioengenharia genética, para desenvolver novas técnicas de produção de biossurfatantes, inclusive com linhagens de micro-organismos geneticamente modificados (OGM), têm recebido o apoio maciço do governo norte-americano. Utilizando as técnicas mais avançadas de clonagem de genes envolvidos na biossíntese de ramnolipídeos, genes de ramnosiltransferase *rhIAB* foram inseridos em micro-organismos receptores, gerando linhagens mutantes de *P. aeruginosa* PEER02 e *E. coli* YnERAB, que se transformaram em bons produtores de ramnolipídeos, com desempenho de 55 a 175 vezes maior, em relação à produção das linhagens selvagens, e com excelentes propriedades de redução da tensão interfacial de emulsões óleo água. (FANG, WANG, SHULER, 2008). Esses estudos confirmam a importância das pesquisas semelhantes realizadas no Brasil, e dos trabalhos descritos acima, dos quais o autor participou como coautor, preparados para publicação e apresentação sobre a produção microbiana de ramnolipídeos.