

RECUPERAÇÃO AVANÇADA DE PETRÓLEO ATRAVÉS DO AQUECIMENTO ELETROMAGNÉTICO ASSOCIADO COM A INJEÇÃO DE ÁGUA: ESTUDO DE CASOS

Manichand, R. N.¹, Mata, W.², Mata, A. L. M. L.¹.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Química
Campus Universitário UFRN, Lagoa Nova, Natal/RN, CEP: 59078-970
renuka@ufrnet.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Elétrica
Campus Universitário UFRN, Lagoa Nova, Natal/RN, CEP: 59078-970
wilson@ct.ufrn.br

Resumo – Os métodos térmicos ocupam uma posição de destaque entre os métodos de recuperação avançada de petróleo devido a sua grande aplicabilidade em reservatórios de óleos pesados, ou seja, de alta viscosidade. Esses métodos consistem em fornecer calor ao óleo de modo a reduzir as forças viscosas, seja por injeção de um fluido quente, como vapor ou ar aquecido, ou pela ação de ondas eletromagnéticas sobre os fluidos da formação. O aquecimento eletromagnético é baseado na transformação de energia elétrica em térmica através da interação direta entre o campo eletromagnético de excitação e as partículas eletricamente sensíveis do meio. O escoamento é considerado trifásico (óleo, gás e água) e o modelo físico aplicado a um reservatório é baseada nos princípios de conservação de massa, energia e movimento em meios porosos, aplicados para as fases fluidas e sólida. Este trabalho visa avaliar o efeito do aquecimento eletromagnético com e sem a injeção associada de água sobre a recuperação de petróleo para dois casos estudados, a partir de simulações termofluidodinâmicas em escala de campo.

Palavras-Chave: recuperação avançada de petróleo; métodos térmicos; aquecimento eletromagnético; óleo pesado; simulação.

Abstract – The thermal methods occupy a prominence position among the advanced recovery methods due to their applicability in heavy oil reservoirs. These methods consist of furnishing heat to the oil reducing in this way its viscosity by injecting a hot fluid, such as steam or hot air, or by the effect of electromagnetic waves on formation fluids. The electromagnetic heating is based on the transformation of electric energy in thermal through the direct interaction between the electromagnetic excitement field and the electrically sensitive particles of the medium. The flow is considered triphasic (oil, gas and water) and the physical model applied to a reservoir is based on the principles of conservation of mass, energy and movement in porous mediums, applied to fluid and solid phases. This work seeks to analyze the effect of electromagnetic heating with and without the association of water injection on oil recuperation for two case studies, starting from thermofluid-dynamic simulations in field scale.

Keywords: enhanced oil recovery, thermal methods, electromagnetic heating, heavy oil, simulation.

1. Introdução

Na indústria do petróleo os principais métodos de recuperação de óleos pesados são os métodos térmicos. Eles buscam, através do aumento da temperatura média no reservatório, reduzir a viscosidade dos fluidos e, conseqüentemente, aumentar a mobilidade da fase óleo. O principal método térmico utilizado atualmente é a injeção de vapor, porém, as restrições a sua aplicabilidade tornaram necessário o desenvolvimento de métodos alternativos a serem aplicados quando a injeção de vapor já não fornece o retorno esperado. O aquecimento eletromagnético, que transforma energia elétrica em térmica (Abernathy, 1976; Pizarro, Trevisan, 1990; Damata, 1993), vem se apresentando como uma alternativa competitiva. O princípio do aquecimento eletromagnético é a interação entre o campo elétrico aplicado e as partículas eletricamente sensíveis do meio, que podem ser íons ou moléculas polares. Quando aplicado o campo elétrico, essas partículas tendem a se deslocar ou se alinhar de acordo com o campo, provocando o aquecimento através de condução ou vibração molecular.

Estudos (Abernathy, 1976; Pizarro, Trevisan, 1990; Damata, 1993; Costa, 1998) comprovam a viabilidade técnica do aquecimento eletromagnético como método térmico de recuperação de petróleo. Neste processo de aquecimento, o volume de reservatório aquecido por energia de radiofrequência, como resultado da interação entre a onda eletromagnética e as partículas eletricamente sensíveis do meio, é grande. Ao contrário dos métodos térmicos convencionais, este fenômeno não depende da difusão térmica do meio mas somente da disposição dos eletrodos que compõem a malha de injeção de corrente elétrica.

Visando otimizar o processo de recuperação, tanto técnica quanto economicamente, optou-se por associar o método térmico em estudo com a injeção de água (Manichand, 2002). Apenas o aquecimento eletromagnético já é suficiente para reduzir a viscosidade do óleo, mas com a água injetada objetiva-se aumentar ainda mais a produtividade da jazida através do deslocamento do óleo em direção aos poços produtores.

2. Materiais e métodos

Para avaliar o desempenho do aquecimento eletromagnético na recuperação de reservatórios de petróleo foram considerados os dois casos estudados: Campo 01 (com óleo de alta viscosidade) e Campo 02 (com óleo de viscosidade intermediária). Com os dados de caracterização dos reservatórios (porosidade, permeabilidade, saturação, entre outros) os casos foram simulados utilizando o simulador comercial STARS da CMG (Computer Modeling Group).

A malha computacional de poços do piloto em Campo 01 (Figura 1) é composta por um poço produtor central, quatro poços de injeção de corrente e dois poços de injeção de água.

A partir dos resultados do aquecimento eletromagnético associado à injeção de água obtidos no Campo 01, optou-se por um novo piloto em uma área que tem um baixo fator de recuperação, porém, com poços de alta produtividade (Campo 02). A malha de poços desse piloto é mostrada na Figura 2. Trata-se de nove poços produtores de óleo, sendo quatro de injeção de corrente e cinco de retorno, e quatro poços injetores de água. Com esse piloto visa-se avaliar melhor como tornar o aquecimento eletromagnético economicamente viável mediante a injeção associada de água.

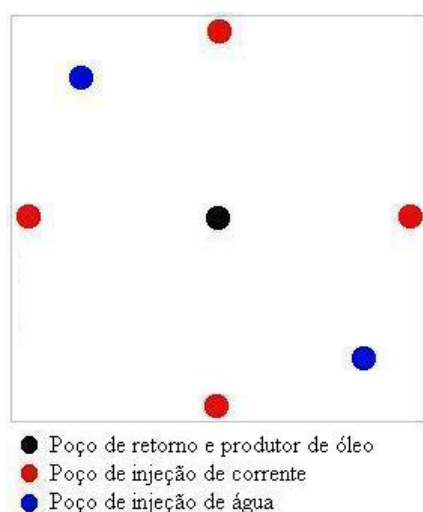


Figura 1. Malha de poços do piloto no Campo 01.

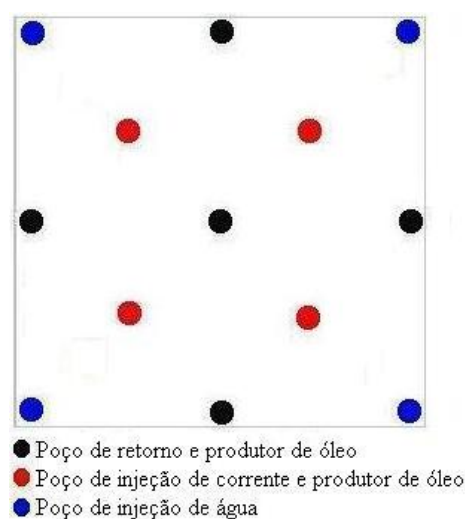


Figura 2. Malha de poços no Campo 02.

Os parâmetros de controle, na aplicação do aquecimento eletromagnético e a injeção associada de água no campo real, são as variáveis estudadas durante as diversas simulações a fim de avaliar o seu efeito sobre a produção de óleo e água. São estes: a temperatura no fundo do poço (T_f), a potência aplicada por poço (Pot), e a vazão de água injetada (Q_{inj}).

As Tabelas 1 e 2 mostram, para os casos estudados de Campo 01 e Campo 02, os níveis dos parâmetros de controle. Os valores simulados são decorrentes das possíveis situações que podem acontecer na prática. As diversas situações simuladas visam avaliar o efeito de cada fenômeno separadamente, ou seja, o efeito apenas do aquecimento eletromagnético, o efeito apenas da injeção de água, e o efeito dos dois métodos associados em relação à produção primária. Dessa forma, torna-se possível obter uma boa visão do ganho na produtividade que cada método proporciona.

Tabela 1. Casos estudados no Campo 01.

T_f (°C)	Pot (kVA/poço)	Q_{inj} (m ³ /d)	Comentário
47	0	0	Produção primária
47	0	10	Efeito de Q_{inj}
120	25	0	Efeito de T_f , Pot e Q_{inj}
150	37,5	0	
150	37,5	10	

Tabela 2. Casos estudados no Campo 02.

T_f (°C)	Pot (kVA/poço)	Q_{inj} (m ³ /d)	Comentário
48	0	0	Produção primária
48	0	20	Efeito de Q_{inj}
150	160	0	Efeito de T_f , Pot e Q_{inj}
150	160	20	
150	320	20	

Com as simulações foram gerados dados de produção diária e acumulada de óleo (Q_o e N_p , respectivamente) e de água (Q_w e W_p , respectivamente) nos casos de produção primária, produção com o aquecimento eletromagnético, produção com a injeção de água, e produção com o aquecimento eletromagnético associado à injeção de água. Para todas as situações simuladas foi calculado o valor presente líquido (VPL) a partir do qual poderá se concluir em que casos a aplicação do aquecimento eletromagnético como método de recuperação avançada, com ou sem a associação da injeção de água, se torna uma alternativa economicamente viável e atrativa.

3. Resultados e discussões

3.1. Campo 01

A fim de analisar os resultados técnicos do método, são apresentados os gráficos de produção diária e acumulada de óleo (Q_o e N_p , respectivamente) (Figuras 3 e 4) com os respectivos níveis de temperatura, potência e vazão de injeção de água simulados.

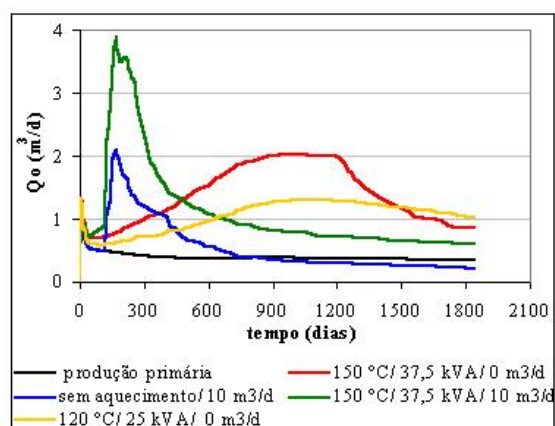


Figura 3: Produção diária de óleo para Campo 01.

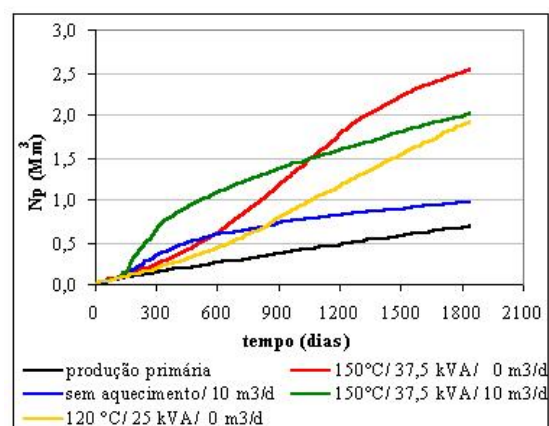


Figura 4: Produção acumulada de óleo para Campo 01.

A influência do aquecimento eletromagnético ficou evidenciada pelo deslocamento das curvas de produção de óleo (Q_o) e de produção acumulada (N_p) em relação ao caso de produções primárias (curvas em preto). De forma qualitativa, os ganhos são bastante significativos. A influência da injeção de água ficou evidenciada pela antecipação da produção (deslocamento das curvas para a esquerda em relação ao caso com aquecimento apenas, sem injeção). Isto é uma ferramenta de gerenciamento de reservatório bastante interessante, pois pode representar, em um determinado cenário de preços de petróleo no mercado mundial, uma substancial receita econômica.

A Tabela 3 mostra os resultados das frações recuperadas e produção acumulada de óleo e de água, e o valor presente líquido (VPL) para os casos estudados do Campo 01. Para o cálculo do valor presente líquido no fim do período de observação foram mantidos os valores reais de receita e custos.

Tabela 3. Resultados de fr, N_p , W_p e VPL para todos os casos estudados de Campo 01.

T_f (°C)	Pot. (kVA/poço)	Q_{inj} (m ³ /d)	fr (%)	N_p (Mm ³)*	W_p (Mm ³)*	VPL (MUS)*
47	0	0	13,1	0,700	0,531	- 40,65
47	0	10	18,1	0,958	15,550	- 23,61
120	25	0	33,1	1,915	2,841	5,88
150	37,5	0	48,7	2,549	7,151	28,27
150	37,5	10	39,0	2,011	14,725	- 68,15

*M = mil.

Observa-se que, de uma forma geral, em todos os casos estudados ocorreu um aumento da fração recuperada. Avaliando o efeito do aquecimento eletromagnético, observa-se um aumento na fração recuperada de 13,1 % no caso da produção primária, para 33,1 % no caso de aquecimento com $T_f = 120$ °C e Pot = 25 kVA, e para 48,7 % no caso de aquecimento com $T_f = 150$ °C e Pot = 37,5 kVA. Com o aumento da produção de óleo ocorreu, também, um aumento da produção de água, porém, o adicional produzido de óleo compensou o custo de tratamento da água produzida e isso resultou num aumento do VPL.

O efeito da injeção de água pode ser avaliado através dos seguintes casos. Observa-se um aumento na fração recuperada de 13,1 % no caso da produção primária, para 18,1 % no caso sem aquecimento com $Q_{inj} = 10$ m³/d. Observando o caso com aquecimento onde $T_f = 150$ °C e Pot = 37,5 kVA com $Q_{inj} = 10$ m³/d em relação ao caso com os mesmos valores de temperatura de fundo e potência aplicada por poço, porém sem a injeção de água, nota-se que há uma redução na produção acumulada de óleo, N_p , acompanhado por um grande aumento na produção acumulada de água, W_p . O alto custo associado ao tratamento desta água produzida faz com que haja uma diminuição no valor do VPL, ou seja, menor interesse econômico do projeto.

Portanto, para o caso estudado de óleo muito viscoso (viscosidade próxima de 5.000 cp), a injeção de água pode, então, beneficiar a produção de óleo desde que sejam mantidas baixas vazões de injeção. Fisicamente, este fenômeno é justificado pela menor mobilidade da fase óleo, em relação à fase água deslocante. Com isto, há uma canalização de água (*viscous fingering*) em direção ao(s) poço(s) produtor(es) e, conseqüentemente, uma menor eficiência de varrido do processo de injeção de água.

A partir dos resultados obtidos no caso do projeto de Campo 01, foi possível observar que o efeito do aquecimento eletromagnético na recuperação suplementar de petróleo foi mais acentuado do que o efeito da injeção de água isoladamente. Isso pode ser explicado pelo fato que o óleo do campo de Campo 01 ser um óleo bastante viscoso e, conseqüentemente, a variação de temperatura sofrida pelo óleo tem como efeito uma redução substancial na sua viscosidade. Este fenômeno é tanto mais importante quanto maior for a viscosidade do óleo.

3.2. Campo 02

Para o projeto de aquecimento eletromagnético no campo de Campo 02, no qual a zona estudada apresenta uma viscosidade de aproximadamente 30 cp, os casos estudados e os resultados da simulação mostram a produção diária e acumulada de óleo (Figuras 5 e 6) para os respectivos níveis de temperatura, potência elétrica injetada por poço e vazão de água injetada por poço.

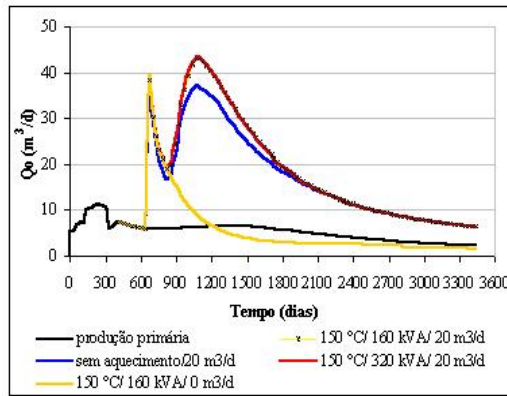


Figura 5: Produção diária de óleo para Campo 02.

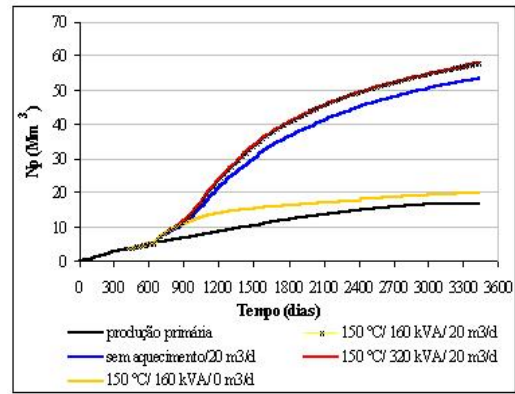


Figura 6: Produção acumulada de óleo para Campo 02.

Observe na Figura 5 que o aquecimento eletromagnético foi iniciado após 640 dias, o que ficou evidenciado pelo primeiro pico nas curvas de produção diária de óleo. Após 850 dias foi iniciada a injeção de água, evidenciada pelo segundo pico nas curvas de produção diária de óleo. A influência do aquecimento eletromagnético ficou evidenciada pelo deslocamento das curvas de produção de óleo (Q_o) e de produção acumulada (N_p) em relação ao caso de produções primárias (curvas em preto). A influência da injeção de água ficou evidenciada pela antecipação da produção (deslocamento das curvas para a esquerda em relação aos casos com injeção apenas, sem aquecimento). O efeito da injeção de água proporcionou, neste caso estudado, um maior ganho na produção.

A Tabela 4 mostra os resultados de fração recuperada (fr), produção acumulada de óleo (N_p) e de água (W_p), e o valor presente líquido (VPL) para os casos estudados de Campo 02. Para o cálculo do valor presente líquido, no fim do período de observação foram mantidos os valores mais prováveis de receita e despesas.

Tabela 4. Resultados de fr , N_p , W_p e VPL para todos os casos estudados de Campo 02.

T_f (°C)	Pot. (kVA/poço)	Q_{inj} (m³/d)	fr (%)	N_p (Mm³)*	W_p (Mm³)*	VPL (MMUS\$)*
48	0	0	8,39	17,70	4,15	2,28
48	0	20	25,35	53,50	158,80	7,68
150	160	0	9,39	19,81	4,56	0,92
150	160	20	27,39	57,79	167,83	6,65
150	320	20	27,42	57,87	168,10	4,97

*M = mil; MM = milhão.

Observa-se que, de uma forma geral, em todos os casos estudados ocorreu um aumento da fração recuperada. Avaliando o efeito da injeção de água, observa-se que a fração recuperada aumentou de 8,39 % no caso da produção primária, para 25,35 % no caso sem aquecimento e $Q_{inj} = 20 \text{ m}^3/\text{d}$. Nos casos com aquecimento eletromagnético onde $T_f = 150 \text{ °C}$ e Pot = 160 kVA, a fração recuperada foi de 9,39 % sem a injeção de água enquanto uma vazão de injeção de $20 \text{ m}^3/\text{d}$ resultou numa fração recuperada de 27,39 %.

Avaliando o efeito do aquecimento eletromagnético, observe-se que, neste campo estudado, não houve um aumento considerável na fração recuperada com apenas o aquecimento ($T_f = 150 \text{ °C}$, Pot = 160 kVA, sem injeção de água) e o valor do VPL diminuiu devido ao custo da aplicação do aquecimento. Observando os casos onde a vazão de injeção foi fixada em $20 \text{ m}^3/\text{d}$, tem-se os casos sem aquecimento e com aquecimento onde a temperatura de fundo foi fixada em 150 °C enquanto a potência aplicada variou de 160 para 320 kVA. Nestes casos, a fração recuperada sofreu um pequeno aumento (de 25,35 para 27,39 e 27,42 %, respectivamente).

Nos casos onde não há diferença considerável nas frações recuperadas, a análise econômica determinará qual é o caso onde o VPL é maior. Fatores como o aumento da potência e da produção acumulada de água, fazem com que o VPL diminua, devido a um aumento do custo de energia e do custo de tratamento de água produzida que nem sempre são compensados por uma produção adicional suficiente de óleo e, conseqüentemente, uma maior receita. Portanto, a decisão do melhor caso tem que estar atrelada não só ao aumento do fator de recuperação do método, mas, também, a análise econômica do projeto.

Desta forma, pode-se concluir que no caso do campo de Campo 02, o efeito da injeção de água é mais acentuado do que apenas o efeito do aquecimento eletromagnético. Isso se explica pelo fato que o óleo do Campo 02 é um óleo menos viscoso e, conseqüentemente, a influência da variação da temperatura na redução da viscosidade do óleo

é menor. Por ser um óleo menos viscoso a água injetada consegue deslocar o óleo com mais eficiência em direção aos poços produtores, resultando em uma melhor eficiência de varrido.

4. Conclusões

Quanto à avaliação do desempenho técnico pode-se concluir que o método de aquecimento eletromagnético pode ser aplicado para aumentar o fator de recuperação de jazidas de petróleo. Ao contrário de alguns outros métodos de recuperação suplementar, ele não apresenta limitações, sobretudo quanto à profundidade da zona de interesse. Porém, algumas condições podem apresentar-se como ideais para a sua aplicação, tais como: quanto mais viscoso o óleo, melhor a eficiência deste método térmico; a temperatura pode ser qualquer desde que não ultrapasse a temperatura de ebulição da água nas condições de reservatório; uma maior salinidade da água de formação favorece a condutividade elétrica; uma saturação de água não muito elevada para não prejudicar a viabilidade econômica do processo.

Observa-se que a maior fração recuperada não implica necessariamente em um maior valor presente líquido. Isto porque há casos em que se consegue aumentar a fração recuperada, porém, com um maior custo de produção o que leva a um menor VPL. Um maior custo de produção pode ser devido ao custo de tratamento de uma produção excessiva de água, ou ainda, devido à necessidade de aplicação de uma maior quantidade de energia elétrica o que eleva o custo de energia fornecida ao sistema. O fato de conseguir obter um fator de recuperação maior é tecnicamente interessante, porém, para a análise econômica leva-se em consideração o caso que proporcionar o maior valor presente líquido, tendo este a maior fração recuperada ou não. Esta é uma ferramenta de gerenciamento de projetos de recuperação suplementar de petróleo muito útil na tomada de decisões.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Agência Nacional do Petróleo e a Petrobras.

5. Referências

- ABERNATHY, E. R., Production Increase of Heavy Oils by Electromagnetic Heating. *The Journal of Canadian Petroleum Technology*, july-september, 1976.
- Computer Modeling Group, STARS versão 2000, Calgary, Canada.
- COSTA, A. P. A., Desenvolvimento de um simulador térmico para recuperação de petróleos viscosos via aquecimento eletromagnético. Dissertação de mestrado UFRN/CT/PPGEQ, Natal/RN - Brasil, 1998.
- DAMATA, W., Récupération Assistée des Pétroles Visqueux par Ondes Electromagnétiques. Doctor These - INPT – France, 1993.
- MANICHAND, R. N., Análise do desempenho do aquecimento eletromagnético na recuperação de reservatórios de petróleo. Dissertação de mestrado UFRN/CT/PPGEQ, Natal/RN - Brasil, 2002.
- PIZARRO, J. O. S., TREVISAN, O. V., Electrical Heating of Oil Reservoirs. *Journal of Petroleum Tech.*, october, 1990.