

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Análise dimensional aplicada à combustão *in situ* (CIS)

AUTORES:

Rui Rodrigo Cabral e Silva

Osvair Vidal Trevisan

INSTITUIÇÃO:

Unicamp e Petrobras

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

Análise dimensional aplicada à combustão *in situ* (CIS)

Abstract

In-situ combustion (ISC) is a noble enhancement oil recovery, which yields high oil recovery factors. Although a very old method, its application has always been very limited, due to technological and financial limitations. The technique was forgotten for some time, but with the demand of production and reduction of the reserves around the world, discussion and research on ISC resurges.

ISC is very complex and involves mass transfer, energy transfer, chemical reactions among other process that occur simultaneously. The success of its applications depends on good planning and study, involving laboratory tests and numerical simulations altogether.

Laboratory tests are a requirement for the assessment of the parameters involved. But not at all lab results may be directly applied to the field. In fact, only the parameters related to the chemical reactions may apply, the others need to be scaled.

The main objective of this work is to verify a methodology for taking the results from laboratory tests onto the design of field projects. The methodology involves numerical simulation and scale analysis techniques.

Three numerical simulation models at different scales are scrutinized. The model at small scale uses the dimensions of the combustion tube installed at Unicamp's Lab. The other two models are developed using dimensional analysis. An intermediate model serves as a step up in the procedure, mainly to check for inconsistencies during the numerical simulations. The larger model has its dimensions at the scale of an oilfield.

Introdução

A modelagem numérica para métodos térmicos vem nesses últimos anos se desenvolvendo bastante junto com o avanço tecnológico da indústria da informática. Os métodos térmicos, como injeção de vapor, CIS e injeção de água quente, têm a peculiaridade do aumento da temperatura dentro do sistema, que ocasiona, além da redução da viscosidade do óleo, uma série de outros eventos como alterações geomecânicas e alteração da composição do óleo. Sendo assim, os modelos analíticos utilizados para estes métodos se mostram bastante limitados e com suas aplicações bastante restritas. A solução tem sido resolver o problema numericamente, utilizando os simuladores, o que também não é trivial, visto que a simulação térmica necessita de um bom refinamento da malha. Na injeção de vapor cíclica, por exemplo, sabemos que o raio de influência do vapor é em torno de trinta metros ao redor do poço. Neste caso, a simulação demanda que a malha seja menor do que esse valor para que seja possível modelar adequadamente o gradiente de temperatura e seus efeitos. Enquanto, em simulações numéricas de métodos de recuperação convencionais utiliza-se normalmente malhas de 50x50 metros. Na CIS o problema é ainda maior, pois a frente de queima de coque tem a dimensão da ordem de centímetros, como foi confirmado no trabalho de Christensen (2004), obrigando a adoção da malha de simulação desta mesma ordem, para poder poduzir resultados confiáveis. Alguns simuladores comerciais possuem o recurso da grade dinâmica, que permite ao usuário modelar sua malha com dimensões maiores, sendo que estas se refinarão a partir da variação de uma propriedade definida, que geralmente é a temperatura. Desta maneira, o simulador trabalha refinadamente onde é necessário e economiza-se tempo de simulação.

Na CIS, a análise dimensional pode ser útil tanto na elaboração de um modelo físico com as dimensões mínimas, que no caso pode ser um tubo de combustão, como na elaboração de um modelo de escalas menores para simulação numérica. Garon (1982, 1986) utilizou a análise dimensional baseado nas dimensões de um campo de petróleo e suas condições de trabalho para desenvolver um aparato experimental e realizar vários experimentos para calibrar e validar seu modelo numérico. Farouq Ali (1989) desenvolveu um estudo sobre técnicas de escalonamento. Constatou que existem seis metodologias diferentes para se utilizar a técnica de escalonamento na CIS, onde cada uma das condições e objetivos da análise.

Metodologia

A análise dimensional empregada neste trabalho origina-se da inspeção das equações governantes e está descrita detalhadamente no trabalho de Farouk Ali (1989). Basicamente, adimensionalizam-se as equações governantes e suas condições de contorno e condições iniciais correspondentes. Os diversos coeficientes adimensionais obtidos, associados a cada termo das equações e suas condições são os parâmetros de escala. Os parâmetros de escala utilizados neste trabalho estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 Parâmetros de escala utilizados

	1	2	3	4	5	6
Parâmetro	$\frac{\phi_R S_{oR} \mu_{oR} x_{1R}^2}{t_R k_{oR} P_{oR}}$	$\frac{x_{2R}}{x_{1R}}$	$\frac{x_{3R}}{x_{1R}}$	$\frac{\rho_{oR} g_R z_R}{P_{oR}}$	$\frac{W_{xR} \mu_{gR}}{x_{2R} \rho_{gR} k_{gR} P_{gR}}$	$x_{2R} = \frac{\rho_{oR} g_R L^2}{P_{oR}}$

A escolha destes parâmetros foi baseada no objetivo do trabalho que é estabelecer uma metodologia válida para utilizar os dados experimentais de laboratório e simulação numérica no projeto de desenvolvimento e no gerenciamento do campo. Não são escalonados os parâmetros cinéticos de reação.

Para o escalonamento dos modelos de simulação foram considerados: mesmo meio poroso, mesma temperatura inicial do sistema, mesmo diferencial de pressão e geometria similar. Com estas considerações e manipulações nos parâmetros 1, 4, 5 e 6 da Tabela 1, chega-se a um escalonamento onde a permeabilidade é inversamente proporcional à cota de injeção, enquanto o tempo aumenta quadraticamente com o aumento da razão geométrica entre os modelos. Esta é a metodologia de análise dimensional mais utilizada para modelos tridimensionais. Ela foi utilizada nos trabalhos de Garon (1982 e 1986) e também nos estudos de análise dimensional de injeção de vapor de Pujol (1972).

Utilizando um fator de escala de 10 entre o modelo intermediário e o modelo de laboratório e um fator de escala de 50 para escalonar do laboratório para a escala de campo, foram obtidas as cotas de injeção, permeabilidade e tempo mostrados na Tabela 2. As dimensões, vazão de injeção e permeabilidade do modelo de laboratório foram baseadas nas dimensões do tubo de combustão instalado na Unicamp e suas condições de trabalho.

Tabela 2 Dados de Laboratório

Dados	Modelo de Laboratório	Modelo Intermediário	Modelo de campo
x_{1R}	6,3 cm	63 cm	315 cm
x_{2R}	6,3 cm	63 cm	315 cm
x_{3R}	100 cm	1000 cm	5000 cm
t_R	1 min	100 min	2500 min

Q_R	650 cm ³ /min	6500 cm ³ /min	32500 cm ³ /min
K	10000 mD	1000 mD	200 mD

Na modelagem dos componentes do fluido foi utilizado um óleo sintético, desenvolvido a partir do modelo usado no trabalho de Coates (1995), utilizando as condições iniciais, propriedades composicionais e modelo de reação de Belgrave (1990), com seis reações para representar o craqueamento e a pirólise do óleo.

As simulações iniciais serviram principalmente para calibrar a malha do modelo verificando a influência do tamanho da malha e a utilização da grade dinâmica.

A análise de sensibilidade seguinte teve como objetivo principal determinar os parâmetros mais influentes na técnica de escalonamento. Sendo assim, toda variação feita no modelo de laboratório foi, nas mesmas proporções, também feita no modelo do protótipo. O que torna mais claras as limitações e possibilidades da técnica. Indiretamente os resultados obtidos permitem uma análise dos fenômenos presentes na CIS. Nesta etapa, foram utilizados apenas o modelo de escala de laboratório e escala intermediária, visto que o modelo em escala de campo demanda muito tempo para cada rodada de simulação numérica.

A Tabela 3 mostra os dados utilizados na nossa análise de sensibilidade para os modelos de laboratório e protótipo respectivamente.

Tabela 3 Dados utilizados na análise de sensibilidade

Rodada	Dados	Modelo de Laboratório	Modelo do Protótipo
1	Q_R	750 cm ³ /min	7500 cm ³ /min
2	Q_R	850 cm ³ /min	8500 cm ³ /min
3	K	8000 mD	800 mD
4	K	12000 mD	1200 mD

Resultados e Discussão

Os resultados foram analisados a partir dos dados de produção dos fluidos, variação da pressão média do sistema, variação da temperatura e evolução do fator de recuperação.

Nas primeiras rodadas de simulação em escala de laboratório, em determinado momento a frente de combustão se apaga parcialmente, o que não acontece no modelo do protótipo. Apesar disso, os fatores de recuperação e temperaturas médias finais ficam próximos em ambos os modelos. Para melhorar o escalonamento entre os dois modelos, foi inserida uma concentração inicial de coque de 0.0022 gmole/cm³ no modelo do tubo, visto que, apesar dos fenômenos de transporte de massa no modelo do tubo ocorrerem mais rapidamente, o mesmo não acontece com os fenômenos químicos, mais especificamente os cinéticos, já que a taxa de injeção de ar no modelo em escala de laboratório é proporcionalmente menor, de maneira que as reações de formação de coque ficam desfavorecidas. A Figura 1 ilustra como a inserção desta concentração inicial do coque melhora o modelo de laboratório, aumentando o fator de recuperação e mantendo a frente de combustão ativa. Marjerrison (1992) adotou o mesmo procedimento e conseguiu bons resultados, melhorando a estabilidade de seu modelo de combustão, sem provocar grande diferença nos valores de produção de óleo.

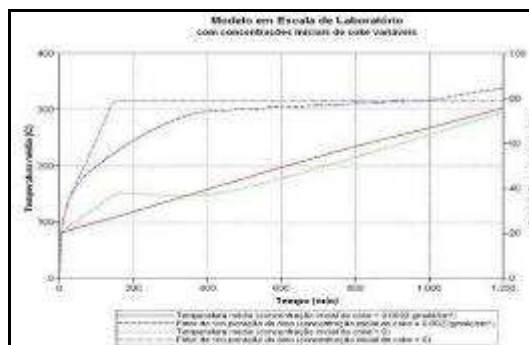


Figura 1 Resultados da simulação em escala de laboratório variando a concentração inicial de coque

Para melhor análise, os resultados foram adimensionalizados e colocados em um mesmo gráfico para ambos os modelos, com exceção do FR e da temperatura. A Tabela 3 mostra os termos empregados na adimensionalização dos resultados.

Tabela 4 Termos de adimensionalização

Variável	Forma adimensional
Tempo	$t_d = \frac{t}{t_f}$
Vazão de óleo	$Q_{od} = \frac{Q_o}{Q_{inj}}$
Vazão de água	$Q_{wd} = \frac{Q_w}{Q_{inj}}$
Vazão de gás	$Q_{gd} = \frac{Q_g}{Q_{inj}}$

As Figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7 mostram a evolução da temperatura média, do fator de recuperação, pressão média, da vazão de óleo adimensional, da vazão de água e da vazão de ar, nos três modelos.

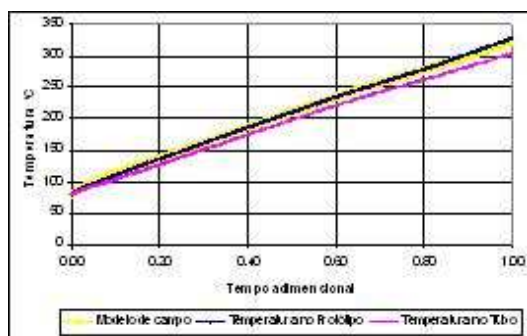


Figura 2 Evolução da temperatura média

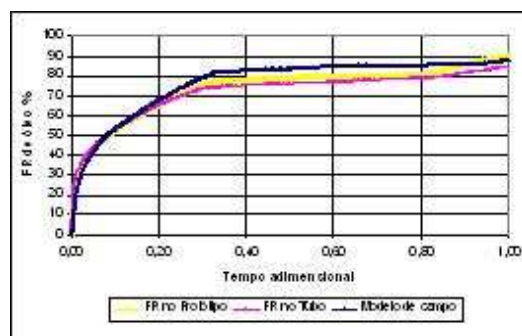


Figura 3 Evolução do fator de recuperação

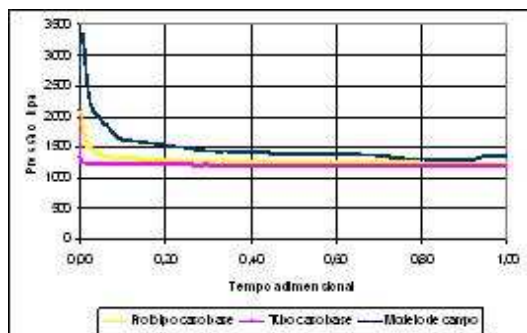


Figura 4 Evolução da pressão média

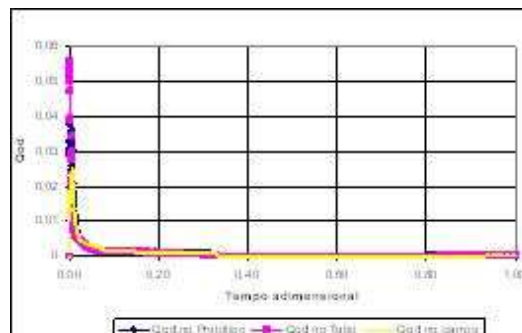


Figura 5 Vazões de Óleo

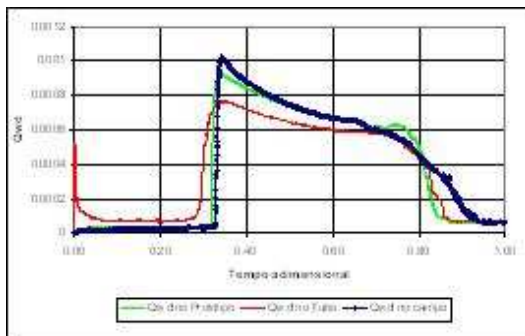


Figura 6 Vazões de água

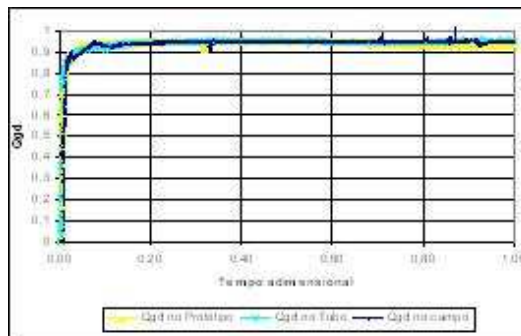


Figura 7 Vazões de ar

O melhor ajuste ficou entre o modelo intermediário e o de campo, visto que, no modelo menor a produção de fluido é quase que instantânea, devido ao efeito de estocagem, que é comum em um modelos com estas dimensões submetido à estas condições de trabalho, enquanto nos outros dois modelos, o sistema necessita ser pressurizado para que a produção possa atingir seu pico.

A produção de gás e a evolução da temperatura média foram os parâmetros para os quais se obteve os melhores resultados.

As Figuras 8 a 13 ilustram os resultados da análise de sensibilidade para as variações da cota de injeção de ar e mostram que, com o aumento da cota, há uma mesma tendência de comportamento para os dois modelos.

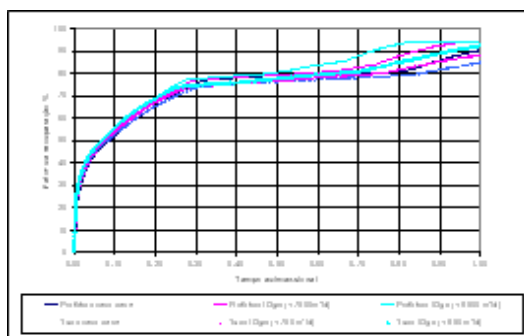


Figura 8 Evolução do fator de recuperação

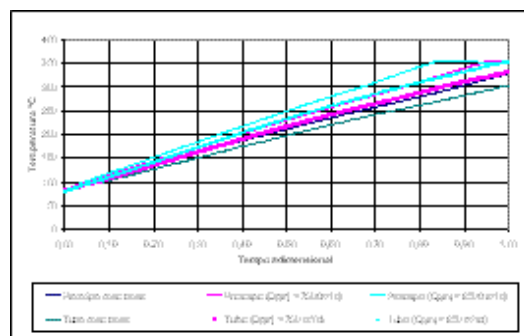


Figura 9 Evolução da temperatura média

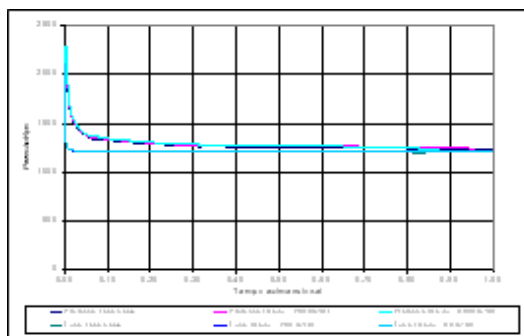


Figura 10 Evolução da pressão média

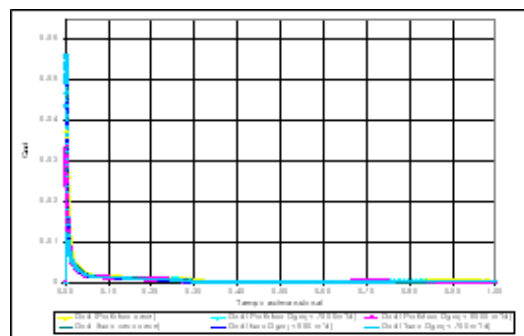


Figura 11 Vazões de óleo

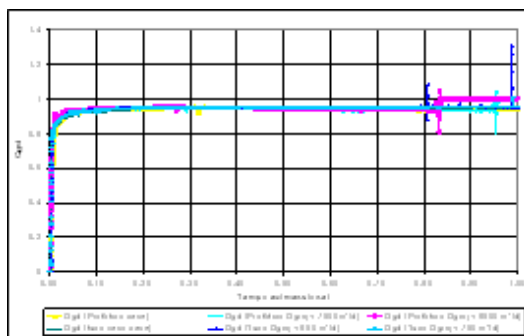


Figura 12 Vazões de gás

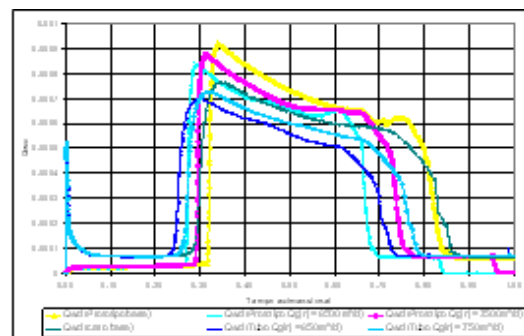


Figura 13 Vazões de água

Com o aumento das cotas de injeção obtém-se uma melhora no fator de recuperação e um aumento da temperatura média. No entanto, a razão óleo por ar injetado decresce e a irrupção de água ocorre mais cedo. O desenvolvimento da pressão média no sistema e as vazões de ar não variam muito.

As Figuras 14 a 18 dispõem os resultados da análise de sensibilidade referente à variação da permeabilidade entre os modelos.

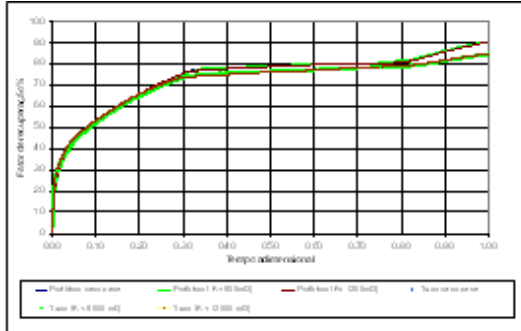


Figura 14 Evolução do fator de recuperação

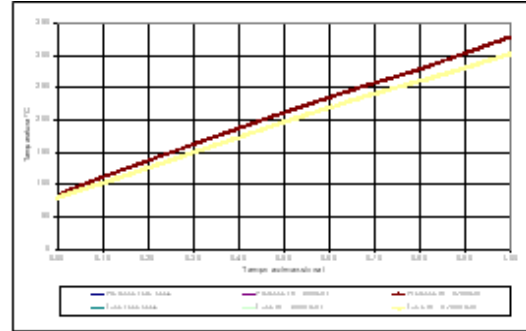


Figura 15 Evolução da temperatura média

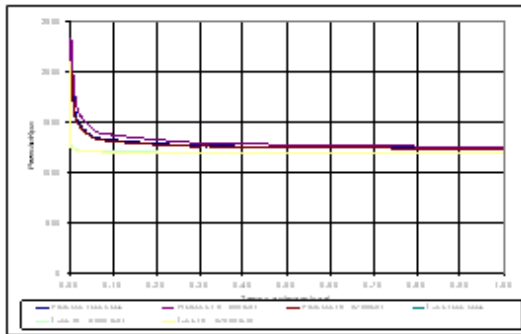


Figura 16 Evolução da pressão média

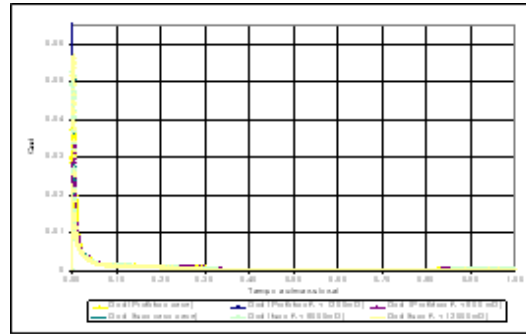


Figura 17 Vazões de óleo

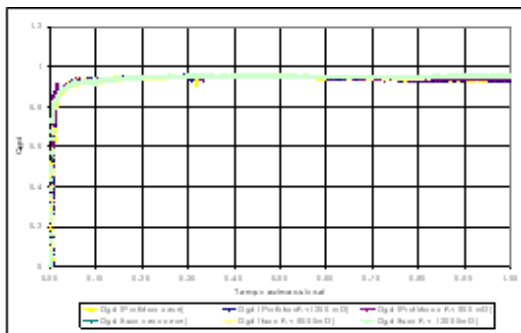


Figura 18 Vazões de gás

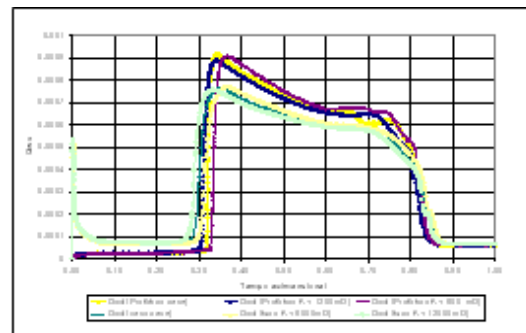


Figura 19 Vazões de água

Os resultados da análise de sensibilidade da permeabilidade são semelhantes aos das cotas de injeção e as mesmas tendências de comportamento podem ser notadas mas com intensidades bem menores, indicando que a permeabilidade absoluta é um parâmetro menos sensível e levantando a questão da relevância em sua utilização na análise dimensional.

Conclusões

Apesar das limitações de modelagem, tanto física quanto numérica, a metodologia de trabalho apresentou bons resultados. Alguns fenômenos específicos, como a estocagem, e a canalização de fluidos precisam ser melhor representados e compensados na análise dimensional.

Vale também dizer que pelo caráter acadêmico deste trabalho nossas simulações foram além da irrupção de água dos modelos com o intuito de compreender melhor os fenômenos da CIS, maximizando as diferenças entre os modelos. Caso a simulação visasse um projeto comercial, ela

não iria muito além da irrupção de água, pois a partir deste momento o projeto deixa de ser comercialmente atrativo, diminuindo o número de discrepâncias de escalonamento. Sendo assim a metodologia de trabalho é válida desde que se conheça bem suas limitações.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro de FINEP e Petrobras para o desenvolvimento do trabalho.

Referências Bibliográficas

1. Christensen, J.R.; H. MA, P. H.; Sammon, Applications of dynamic gridding to thermal simulations, SPE 86969, 2004.
2. Garon , A. M.; Geisbrecht, R. A.; Scaled Model Experiments of Fireflooding in Tar Sands, 1982.
3. Garon, A. M.; Kumar, M.; Lau, K. K.; Sherman, M. D.; A laboratory Investigation of Sweep Oxygen and Air Firefloding, 1986.
4. Coates, R.; Lorimer, S.; Ivory, J.; Experimental and Numerical Simulation of a Novel Top Down In-situ Combustion Process, 1995.
5. Pujol, L.; Boberg, T. C.; Scaling Accuracy of Laboratory Steam Flooding Models, 1972.
6. Farouq Ali, S. M.; Islam, M. R.; Scaling Criteria For In-situ Combustion Experiments, 1989.
7. Marjerrison, D. M.; Fassihi, M. R.; Amoco Canada; A procedure for Scaling Heavy-oil Combustion Tube Results to a Field Model, 1992.
8. Belgrave, J. D., Moore, R. G., Ursenbach, M. G., Bennion, D. W.: “A Comprehensive Approach to In-Situ Combustion Modelling. “Paper SPE/DOE 20250 presented at SPE/DOE 7th Symposium on Enhanced Oil Recovery, Tulsa, OK., USA, April 22-25, 1990.