



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE

**I Congresso Nacional de Engenharia de
Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**

III Workshop de Engenharia de Petróleo



APLICAÇÃO DA COMBUSTÃO IN-SITU EM RESERVATÓRIOS COM CARACTERÍSTICAS DO NORDESTE BRASILEIRO

Mirella Lopes da Rocha; Allene de Lourdes Souto de Moura²; Caroline Suzy do Nascimento Garcia,
Jennys Lourdes Meneses Barillas⁴

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo -
mirella_rocha91@hotmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo -
allene_moura@hotmail.com

**www.conepetro.com
.br**

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br



¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo - carol_suzy@hotmail.com

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo - jennys@eq.ufrn.br

RESUMO

Com um número crescente de campos maduros, a recuperação de óleo pesado tem se apresentado um dos grandes desafios do setor petrolífero. O Nordeste Brasileiro, por exemplo, possui inúmeros reservatório de óleo pesado que possam vir a ser explorados com a utilização de métodos térmicos. Dentre os tipos de métodos utilizados para óleos pesados, destaca-se o método da combustão m-



situ, uma técnica no qual o calor é produzido dentro do reservatório, diferente da injeção de fluido aquecido em que o calor é gerado na superfície e transportado para o reservatório. Neste tipo de processo, é comum utilizar poços verticais como injetores e produtores. Sendo assim, o objetivo principal do presente trabalho foi estudar as diferentes configurações de poços (CIS) no processo de combustão *in-situ*, na recuperação de óleo, utilizando um reservatório semissintético com características do Nordeste Brasileiro. As simulações foram realizadas em um programa comercial de processos térmicos, denominado “STARS” (*Steam, Thermal, and Advanced Processes Reservoir Simulator*), da empresa CMG (*Computer Modelling Group*). Foi realizada uma análise da vazão de injeção de ar e verificou-se que cada método possuía um limite máximo de injeção para o modelo base, mostrando que passando desse limite de injeção de ar, havia redução da produção de óleo. Foram realizadas análises dos parâmetros operacionais: vazões de injeção, configuração e



II CONEPETRO
II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE

I Congresso Nacional de Engenharia de
Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
III Workshop de Engenharia de Petróleo



completação dos poços. Os resultados mostraram que o parâmetro que mais influenciou o sistema foi a completção dos poços.

Palavras-chave: injeção de ar, óleo pesado, combustão *in-situ* e simulação computacional.

[www.conepetro.com](http://www.conepetro.com.br)
.br

(83) 3322.3222
contato@conepetro.com.br



II CONEPETRO
II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE

**I Congresso Nacional de Engenharia de
Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**

III Workshop de Engenharia de Petróleo



1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda por petróleo no mundo, e a escassez com relação à descoberta de novos reservatórios com

www.conepetro.com.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br



elevado grau API (óleo leve), tornam indispensável à exploração de reservatórios não convencionais, que apresentam grau API inferior a 19, com elevada viscosidade e densidade. (CHICUTA, 2009).

A ocorrência de reservatórios não convencionais de óleos pesados e ultra

pesados, vêm aumentando sensivelmente, no entanto, devido a elevada viscosidade do óleo, os métodos convencionais de recuperação não podem ser aplicados nesses locais, necessitando, assim, maiores investimentos e, conseqüentemente, desenvolvimento de novas tecnologias com finalidade de recuperação de



a exploração desses reservatórios. (ARAÚJO, 2012).

Diante deste cenário, os métodos térmicos vêm sendo estudados para aplicação nesses campos, tendo como principal objetivo a redução da viscosidade do óleo através do aumento da temperatura do reservatório,

favorecendo a mobilidade do óleo no meio poroso, acarretando em um aumento no índice de produtividade desses reservatórios.

Dentre os métodos térmicos, a combustão *in situ* é um dos métodos mais antigos na indústria de petróleo e o mais eficiente energeticamente (SILVEIRA, 1999).



CASTANIER *et al.*, 2002). Esse método consiste na queima de parte do próprio óleo do reservatório, criando-se uma frente de calor, que avança dentro do reservatório reduzindo a viscosidade do óleo, aumentando sua mobilidade no meio poroso (CARCOANA, 1992).

Portanto, o objetivo do trabalho foi estudar diferentes configurações de poços no processo de combustão *in-situ*. o objetivo principal do presente trabalho foi estudar as diferentes configurações de poços (CIS) no processo de combustão *in-situ*, na recuperação de óleo, reduzindo a viscosidade do reservatório.



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE

**I Congresso Nacional de Engenharia de
Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**

III Workshop de Engenharia de Petróleo



semissintético com características do Nordeste Brasileiro. As simulações foram realizadas em um programa comercial de processos térmicos, denominado “STARS” (*Steam, Thermal, and Advanced Processes Reservoir Simulator*), da empresa CMG (*Computer Modelling Group*).

2. METODOLOGIA

Foi analisado um reservatório homogêneo com características do Nordeste Brasileiro. As dimensões da malha e as características do reservatório podem ser observadas na [Tabela 1](http://www.conepetro.com.br)

www.conepetro.com.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br



Tabela 1 : Dimensões da malha e propriedades da rocha-reservatório.

	Sistema 3D
--	------------

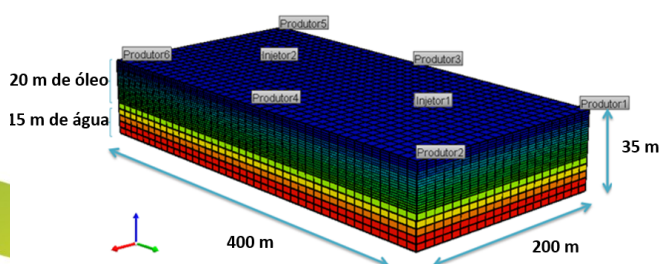
Número total de blocos	21.525
Dimensão em x (m)	200
Dimensão em y (m)	400
Dimensão em z (m)	35
Numero de blocos em i	21
Tamanho do bloco em i (m)	9.5238
Numero de blocos em j	41



Tamanho do bloco em j (m)	9.756	Permeabilidade Horizontal (Kh, mD)	1000
Numero de blocos em k	25	Permeabilidade Vertical (Kv, mD)	0,1 x Kh
Tamanho do bloco em k (m)	Variável	Porosidade (%)	30
Área do reservatório (m ²)	80.000	Pressão inicial @ 200 m (psia)	287
Profundidade do reservatório (m)	35		
Temperatura inicial (°C)	110		
Contato água-óleo (m)	220		



A Figura 1 mostra o reservatório estudado.



Os componentes utilizados na modelagem do fluido foram agrupados em 6 (seis) pseudocomponentes, sendo: óleo pesado (C_{40+}), óleo médio (C_{20-39} e C_{10-19}), óleo leve (C_{6-9} , C_{4-5} e C_{1-3}) e 4 (quatro) componentes: gás inerte (CO_2 e N_2), oxigênio (O_2) e água (H_2O), e CO_2 (CO_2).



A Tabela 2 Erro: Origem da referência não encontrada apresenta os agrupamentos e a fração molar de cada componente e pseudocomponentes.

Tabela 2: Agrupamento e percentual dos componentes.

Componentes	Fração Molar Inicial (%)
H ₂ O	0
O ₂	0
CO ₂	0,40848
N ₂	0,15177
C1-8	0,83975

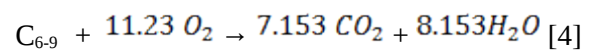
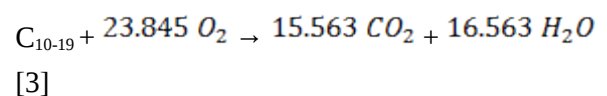
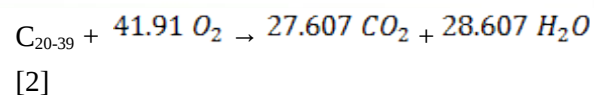


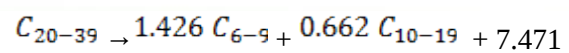
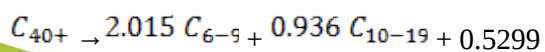
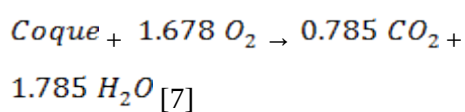
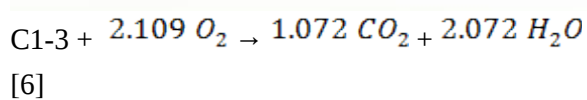
C4-5	0,32485
C6-9	0,26498
C10-19	17,104
C20-39	47,083
C40+	25,932
Coque	0

As reações químicas incluídas no modelo são mostradas nas equações 1 – 12. Dentre as reações químicas participantes no modelo, as sete primeiras representam as reações de oxidação que ocorrem no sistema. A reação sete envolve a oxidação do coque (C). Da oitava a décima e décima primeira

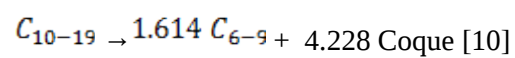


representam o craqueamento do óleo pesado (C_{21-40+}) e óleo médio (C_{13-20}). As reações químicas foram ajustadas no módulo Builder da CMG.

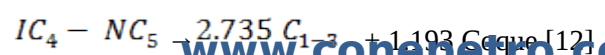




Coque [9]



Coque [11]





A energia de ativação e a entalpia das reações podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3: Energia de Ativação e entalpia da reação.

Reações	Energia de Ativação (BTU/lbmol)	Entalpia da Reação (BTU/lbmol)
Reação 1	32785	814240
Reação 2	32785	4521600
Reação 3	32785	2102400



Reação 4	32785	2102400
Reação 5	32785	2102400
Reação 6	32785	2102400
Reação 7	28800	230000
Reação 8	28800	20000
Reação 9	28800	20000

Reação 10	28800	20000
Reação 11	28800	20000
Reação 12	28800	20000

No CIS tradicional os parâmetros operacionais utilizados foram: vazões de injeção de ar, completação do poço injetor e

www.conepetro.com.br

(83) 3322.3222
contato@conepetro.com.br



completação do poço produtor para as configurações de poços *9-spot* e *5-spot*. A Tabela 4 apresenta os intervalos em que os parâmetros foram analisados.

Os níveis são representados por valores mínimos (-1), valores intermediários (0) e valores máximos (+1). O estudo de

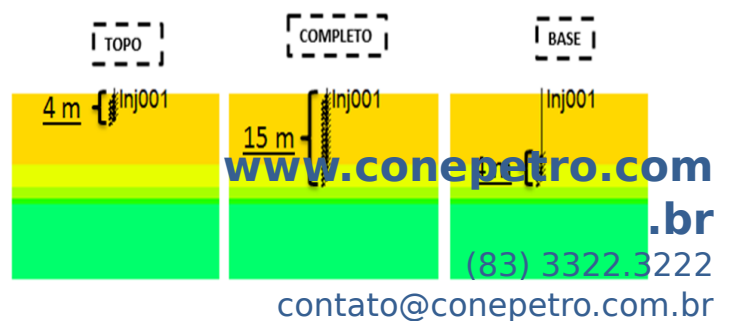
sensibilidade dos fatores foi realizado com a técnica de análise de planejamento experimental de três fatores e três níveis (3^3), totalizando 27 simulações, em função da fração recuperada (FR).

Tabela 4: Intervalo dos parâmetros estudados para CIS para 5-spot.



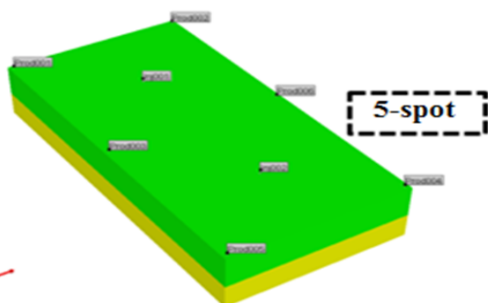
PARÂMETROS	Níveis		
	-1	0	1
Vazão de Injeção total (m ³ STD/dia)	20000	50000	70000
Completação Injetor	topo	Completo	base
Completação Produtor	topo	Completo	Base

A Figura 2 representa como foram feitas as completações nos poços injetores e produtores (topo, completo, base).





A Figura 3 representa a configuração dos poços para o método CIS tradicional.



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise da Vazão de Injeção de ar

O modelo base utilizado para a construção do método CIS no reservatório é constituído por duas malhas de 5-spot invertido com dois injetores e seis produtores,

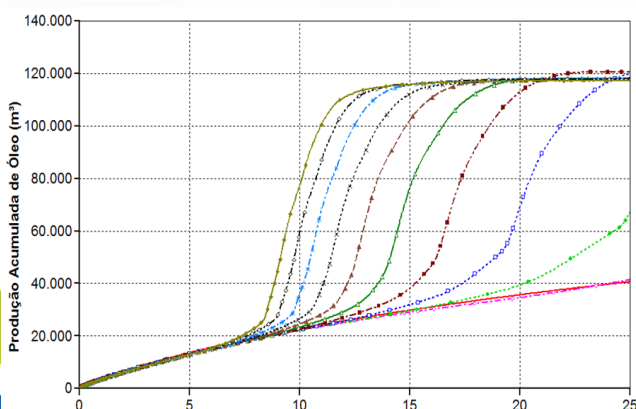


sendo completados da primeira até a décima quinta camada, totalizando 15 m. Para esta configuração de poços foi realizada uma análise da variação de injeção de ar com concentração 21% de oxigênio.

A Figura 4 mostra a produção acumulada de óleo para diferentes vazões de

injeção de ar e a recuperação primária, em função do tempo.

Figura 4: Análise da Vazão de Injeção de ar.



Na Figura 4, a recuperação primária, modelo sem injeção de ar, apresenta uma produção acumulada de óleo em torno de 40.000 m³ em 25 anos. Com a injeção contínua de ar no meio poroso, foi possível observar um incremento na produção



acumulada de óleo no decorrer do tempo. Para um sistema com vazão de injeção de 50.000 m³STD/dia, observa-se uma produção acumulada de óleo de aproximadamente 118.000 m³, ou seja, um incremento de 78.000 m³ quando comparado com o modelo sem injeção. Para uma vazão de injeção de ar de

100.000 observa-se no sétimo ano um incremento na produção acumulada de óleo. Esse mesmo efeito também ocorre para as outras vazões de injeção, porém em tempos diferentes, mostrando que o incremento da vazão de injeção proporciona uma antecipação



economicamente representa uma antecipação de receita, ressaltando que esse aumento na vazão implica em maiores custos no processo. Apesar da antecipação da produção com o aumento da vazão de injeção de ar, foi observada uma redução na produção de óleo ao fim do projeto que foi similar para a

maioria das vazões de injeção de ar, quando as vazões de injeção de ar ultrapassavam 40.000 m³STD/dia, mostrando que há um limite de injeção de ar no sistema.

3.2 Análise de Sensibilidade



Essa seção tem como objetivo analisar a influência de alguns parâmetros operacionais em três diferentes períodos, 5,10 e 25 anos, em função da variável resposta, fração recuperada de óleo, com o auxílio do Diagrama de Pareto e superfícies de resposta.

Foi realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros operacionais: vazão de injeção de ar, completção do poço injetor e completção do poço produtor, para o método CIS tendo como resposta o percentual de óleo recuperado. Foi usada a técnica de análise de superfície de



experimental com três níveis (3^3), totalizando 27 simulações.

A Tabela 5.1 apresenta os intervalos em que os parâmetros foram analisados. Os níveis são representados por valores mínimos (-1), valores intermediários (0) e valores máximos (1).

Tabela 5.1 : Planejamento para o método CIS.

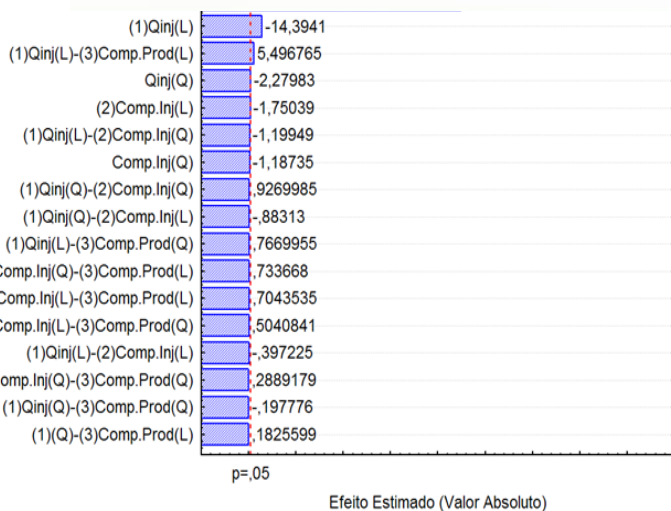
PARÂMETROS	Níveis		
	-1	0	1
<i>Vazão de Injeção total (m^3STD/dia)</i>	20.000	50.000	70.000
<i>Completação Injetor</i>	Topo (1:5)	Base (10:15)	Completo (1:15)



<i>Completção Produtor</i>	Topo (1:5)	Base (10:15)	Completo (1:15)
--------------------------------	---------------	-----------------	--------------------

(FR) como variável resposta em 5 anos e 25 anos.

A análise da significância dos parâmetros operacionais e das interações entre eles foi realizada através do diagrama de Pareto, tendo o fator de recuperação de óleo



A Figura 5 apresenta o diagrama de pareto para o fator de recuperação em 5 anos de produção.

Figura 5: Diagrama de Pareto FR: 5 anos

Na Figura 5 pode ser observado que em 5 anos de produção os efeitos que



apresentaram uma influência estatisticamente significativa em ordem decrescente, foram a Completação do poço produtor (Comp.Prod) e a vazão de injeção (Q_{inj}). Uma mudança na completação do poço produtor do topo (-1) para completo (+1) incrementa a fração de óleo recuperada nesse tempo, pois quando o

poço produtor é completado integralmente maior área ao fluxo é criada, logo maior será a produção de óleo.

A vazão de injeção de ar influencia negativamente em 5 anos o fator de recuperação, visto que, é necessário um período para que o ar entre em contato com o

www.conepetro.com.br

(83) 3322.3222
contato@conepetro.com.br



óleo, e assim as reações químicas venham a ocorrer para que haja a formação da frente de combustão.

A Figura 6 apresenta o diagrama de pareto para o fator de recuperação em 25 anos de produção.

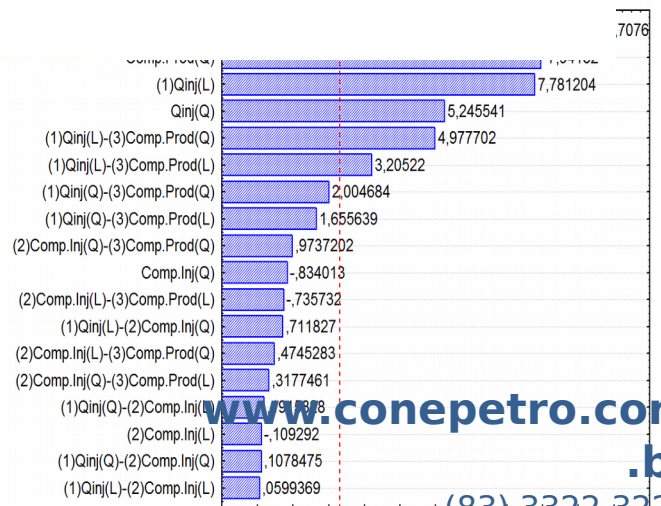




Figura 6: Diagrama de Pareto FR: 25 anos

A Figura 6 mostra que a interação que apresentou maior influência foi a mesma ordem do período de 5 anos, a única diferença foi que o efeito linear da vazão de injeção passou a ser positivo. A variável completção

do poço produtor (Comp.Prod) continua afetando positivamente o fator de recuperação. A vazão de injeção de ar passa a influenciar positivamente em 10 anos o fator de recuperação, isto porque as reações químicas já ocorreram e a presença de maiores quantidades de gás no reservatório



expansão da frente de combustão no meio poroso, o que proporcionou um deslocamento do óleo em direção aos poços produtores e consequente produção do mesmo, ou seja, para este tempo específico é viável o aumento da vazão de injeção de 20.000 m³STD/dia para 50.000 ou 70.000 m³STD/dia.

O estudo mostrou a importância da análise das variáveis operacionais no fator de recuperação, observando-se que é possível obter maiores recuperações de óleo mudando algumas condições operacionais, contudo é necessário verificar também a viabilidade econômica desse método.



4. CONCLUSÕES

A análise da vazão de injeção de ar para o modelo base do método CIS, mostrou que a injeção de ar promoveu um aumento na produção acumulada de óleo, porém até certo limite de injeção de 40.000 m³STD/dia, dado que vazões acima desta apresentavam rápida

depleção no reservatório e conseqüente redução na produção de óleo. A produção acumulada de óleo se deu a partir do 7^a ano de projeto.

A análise de sensibilidade mostrou que o parâmetro mais influente em 5 e 25 anos de produção, foi a completação do poço



produtor e, seguido da vazão de injeção de ar. Para este método os melhores resultados foram obtidos com o poço produtor totalmente completado (15 metros), visto que, maior área ao fluxo foi criada, logo maior produção de óleo.

5. AGRADECIMENTOS

A Petrobras PRH-221 pelo apoio financeiro e a instituição de Ensino UFRN.



6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, J. S. *Estudo paramétrico do processo de combustão in situ como método de recuperação avançada de petróleo*. Tese de Doutorado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de

Petróleo. Área de Concentração: Engenharia e Geologia de Reservatórios e de Exploração de Gás Natural (ERE), Natal-RN, Brasil, 2012.

CARCOANA, A. *Applied Enhanced Oil Recovery*. New Jersey: Prentice Hall Englewood Cliffs, 1992.

www.conepetro.com.br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br



II CONEPETRO
II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE

**I Congresso Nacional de Engenharia de
Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**

III Workshop de Engenharia de Petróleo



CASTANIER, L. M.; BRIGHAM W. E.
Upgrading of crude oil via in situ combustion.
Journal of Petroleum Science and
Engineering., V39,p 125-136,2002.

CHICUTA, A. M.; *Estudo Experimental
Sobre Recuperação de Óleo Pesado Através
da Combustão In-Situ.* Dissertação de
Mestrado em Ciências e Engenharia de
Petróleo, Universidade Estadual de Campinas,

[www.conepetro.com](http://www.conepetro.com.br)
.br

(83) 3322.3222
contato@conepetro.com.br



II CONEPETRO
II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE

**I Congresso Nacional de Engenharia de
Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**

III Workshop de Engenharia de Petróleo



Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto
de Geociências, 2009.

SARATHI, P. S., In-Situ Combustion
Handbook – *Principles and Practices*, United
States Department of Energy Petroleum
Technologies, Oklahoma Tulsa, 1999.

[www.conepetro.com](http://www.conepetro.com.br)
.br

(83) 3322.3222
contato@conepetro.com.br