

5 Estudo de Casos

5.1. Definição dos Reservatórios

Para os estudos de casos realizados nesse trabalho foram utilizados reservatórios utilizados em trabalhos anteriores além de novos reservatórios criados especificamente para testar a capacidade deste algoritmo evoluir.

Inicialmente, foi criado um modelo de reservatório onde a configuração de poços e laterais ótima é conhecida. O modelo desse reservatório se encontra no apêndice A como Reservatório 1. O Reservatório 1 é um modelo com 2700 blocos e baixa permeabilidade. O reservatório possui óleo somente em uma pequena área, essa área tem a forma de um poço horizontal com duas laterais perpendiculares. A Figura 49 apresenta a vista superior da segunda camada do Reservatório 1 onde em vermelho está a região com saturação de óleo de 0,95 e em verde a região onde a saturação de óleo é 0,01. A solução ótima para esse modelo é um poço principal ao longo da direção J e duas laterais, uma em cada lado do poço principal ao longo da direção I.

As propriedades desse modelo estão apresentadas na Tabela 3 abaixo.

Propriedade	Valor
Dimensões	30 I x 30 J x 3 K
Número de poços principais	1
Número de laterais esperadas	2
Espaço de busca em IJK	10^{16}
Direção do poço principal desejado	J

Tabela 3. Propriedades do Reservatório1.

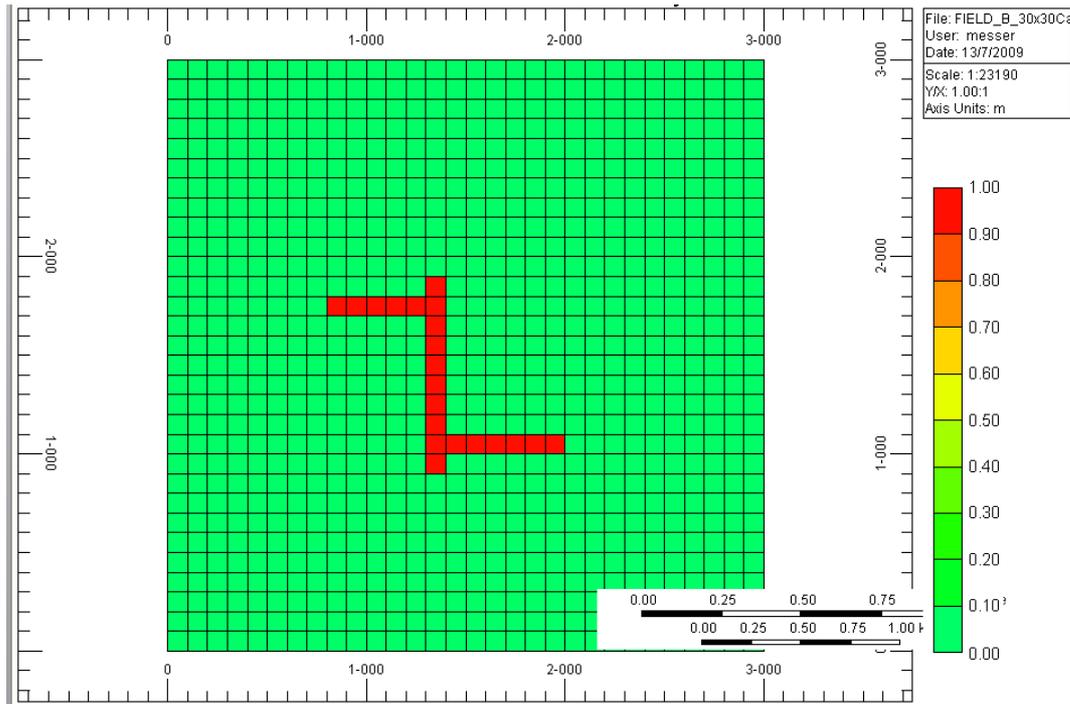


Figura 49. Saturação de óleo na segunda camada do Reservatório 1.

Outro reservatório criado para os estudos de casos é o Reservatório 2, cujo modelo se encontra disponível no apêndice A. O Reservatório 2 consiste em um reservatório onde o ótimo também é conhecido, com o óleo concentrado em uma região horizontal do reservatório. A Figura 50 ilustra a vista superior da saturação de óleo no reservatório, onde o azul possui uma saturação de 0,01, o amarelo de 0,6 e o vermelho de 0,95. O ótimo, nesse reservatório, se dá na forma de poço horizontal sem laterais na região de saturação 0,95 de óleo.

As propriedades desse modelo estão apresentadas na Tabela 4 abaixo.

Propriedade	Valor
Dimensões	30 I x 30 J x 1 K
Número de poços principais	1
Número de laterais esperadas	0
Espaço de busca em IJK	10 ⁷
Direção do poço principal desejado	I

Tabela 4. Propriedades do Reservatório 2.

O terceiro reservatório criado é uma ampliação do Reservatório 2. O Reservatório 3, cujas características também se encontram no apêndice A, adiciona uma região com óleo próxima a existente, dando espaço para que o novo poço ótimo seja um poço horizontal com uma lateral perpendicular. A Figura 51 ilustra uma vista superior do reservatório.

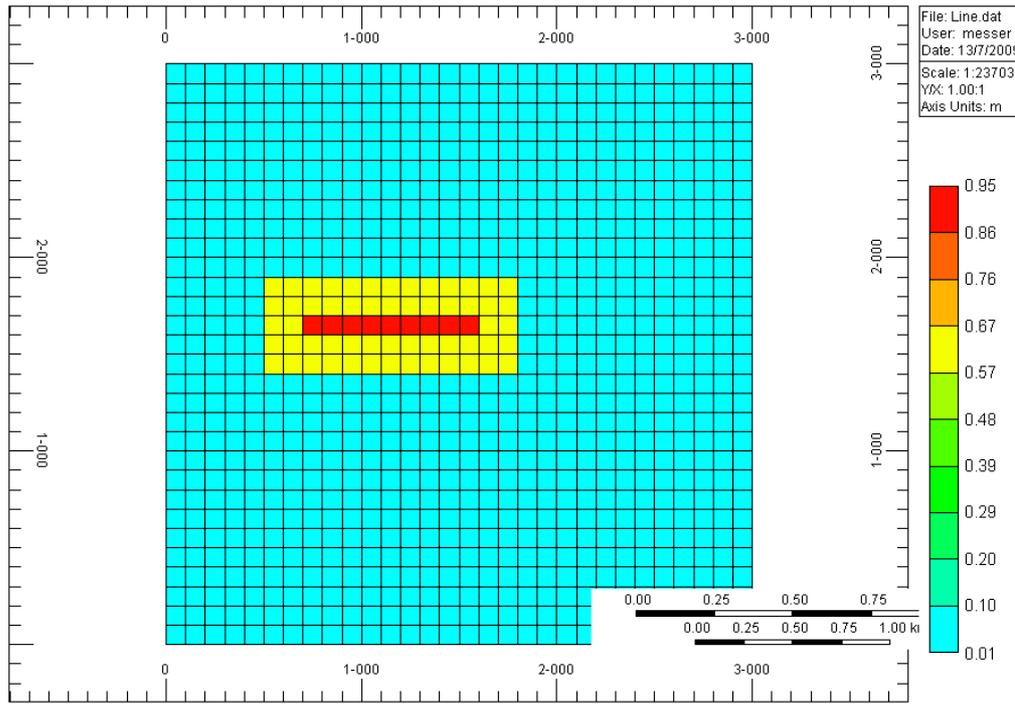


Figura 50. Saturação de óleo do Reservatório 2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0721359/CA

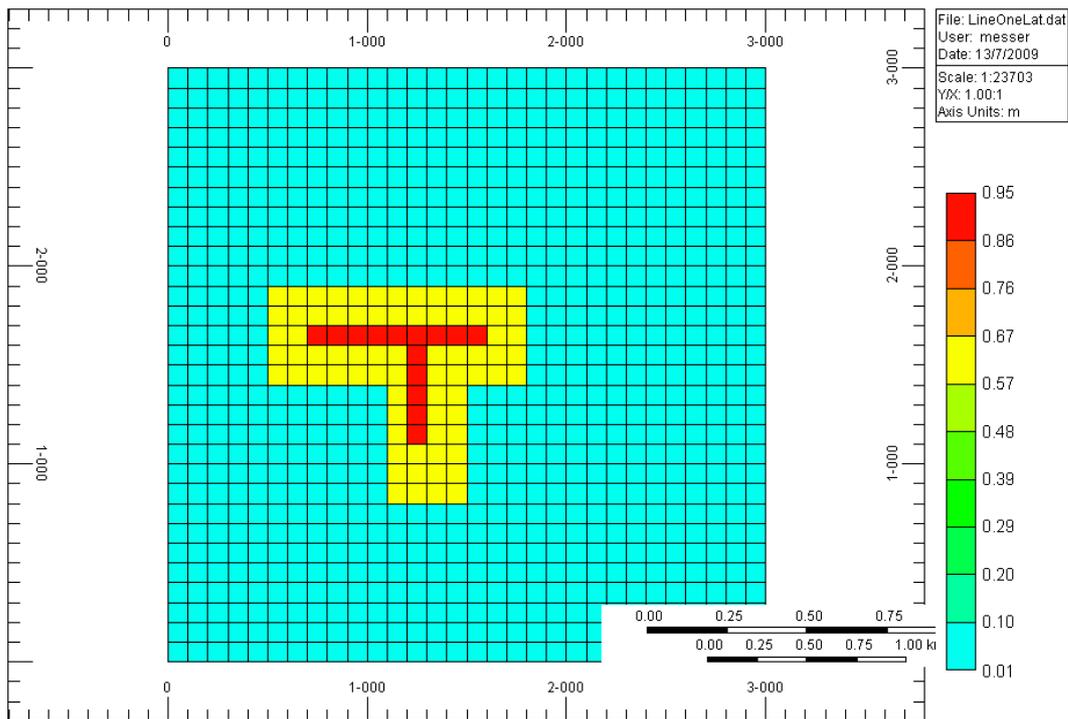


Figura 51 Saturação de óleo do Reservatório 3.

As propriedades desse modelo estão apresentadas na Tabela 5 abaixo.

Propriedade	Valor
Dimensões	30 I x 30 J x 1 K
Número de poços principais	1
Número de laterais esperadas	1
Espaço de busca em IJK	10 ¹¹
Direção do poço principal desejado	I

Tabela 5. Propriedades do Reservatório 3.

Outro reservatório criado para os estudos de casos é o Reservatório 4, cujo modelo também se encontra disponível no apêndice. O Reservatório 4 consiste em um reservatório com ótimo também conhecido, onde o óleo está concentrado em uma região vertical do reservatório. A Figura 52 ilustra a vista superior (igual para todas as camadas) da saturação de óleo no reservatório, onde o azul possui uma saturação de 0,01, o verde de 0,3 e o vermelho de 0,95. O ótimo, nesse reservatório, se dá na forma de poço vertical sem laterais na região de saturação 0,95 de óleo que percorre todas as camadas do reservatório.

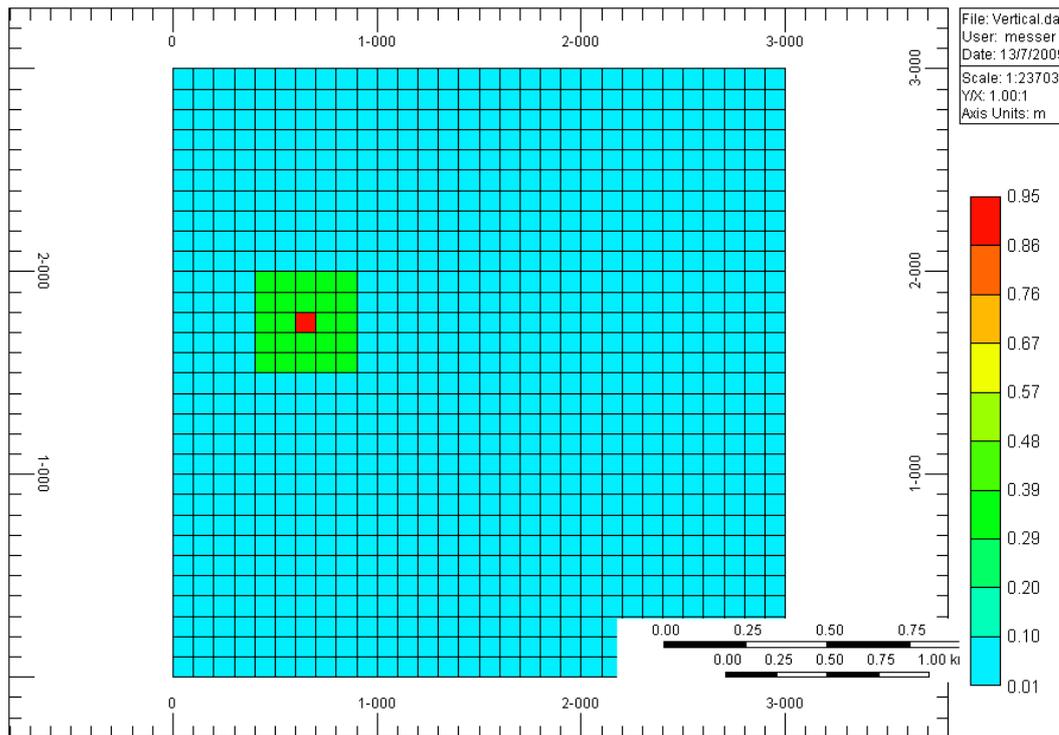


Figura 52. Saturação de óleo do Reservatório 4.

As propriedades desse modelo estão apresentadas na Tabela 6 abaixo.

Propriedade	Valor
Dimensões	30 I x 30 J x 3 K
Número de poços principais	1
Número de laterais esperadas	0
Espaço de busca em IJK	10^7
Direção do poço principal desejado	K

Tabela 6. Propriedades do Reservatório 4.

O quinto reservatório criado é uma ampliação do Reservatório 4. O Reservatório 5, que também possui suas características descritas no apêndice A, adiciona uma região com óleo próxima a existente, dando espaço para que o novo poço ótimo seja um poço vertical com uma lateral perpendicular. A Figura 53 ilustra uma vista frontal do reservatório com um corte na posição onde existe a concentração de óleo.

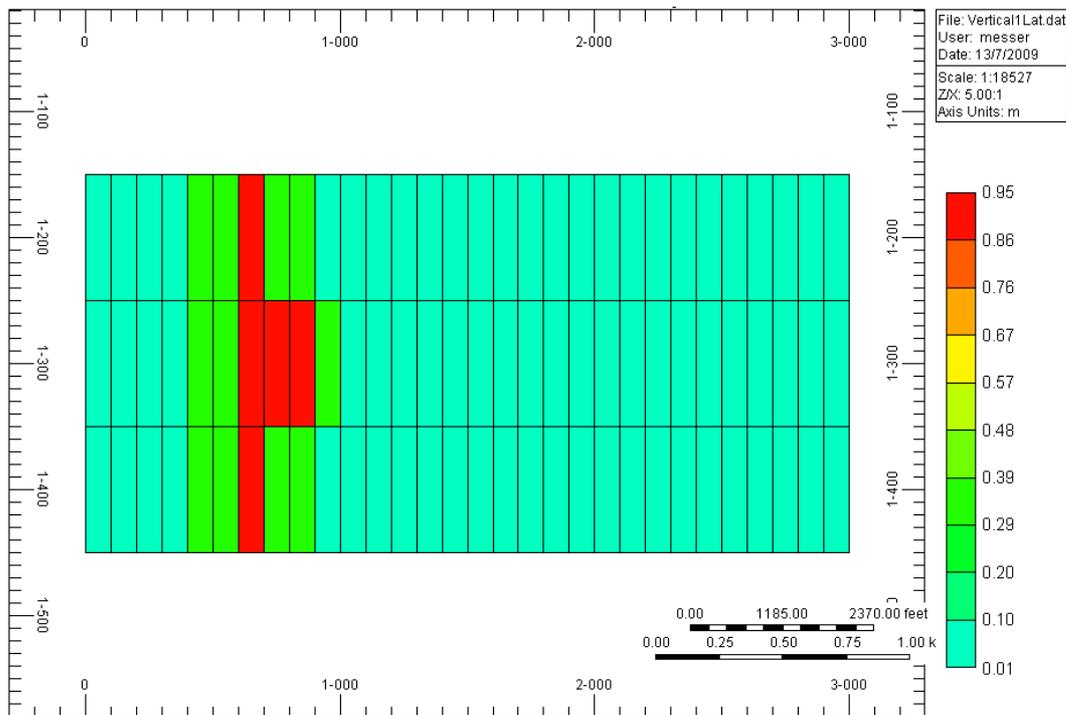


Figura 53. Saturação de óleo do Reservatório 5.

As propriedades desse modelo estão apresentadas na Tabela 7 abaixo.

Propriedade	Valor
Dimensões	30 I x 30 J x 3 K
Número de poços principais	1
Número de laterais esperadas	1
Espaço de busca em IJK	10^{11}
Direção do poço principal desejado	K

Tabela 7. Propriedades do Reservatório 5.

O Reservatório 6 é um reservatório heterogêneo semi-sintético com características próximas a um reservatório real. O Reservatório 6 possui um aquífero que mantém a pressão do reservatório e reduz a necessidade de injetores. Outra característica é a presença de falhas que não permitem a passagem de fluidos. A Figura 54 apresenta o mapa de porosidade do Reservatório 6. A malha de drenagem ótima para esse reservatório é desconhecida, sendo possível apenas a comparação dos resultados aqui encontrados com alternativas propostas por outras técnicas.

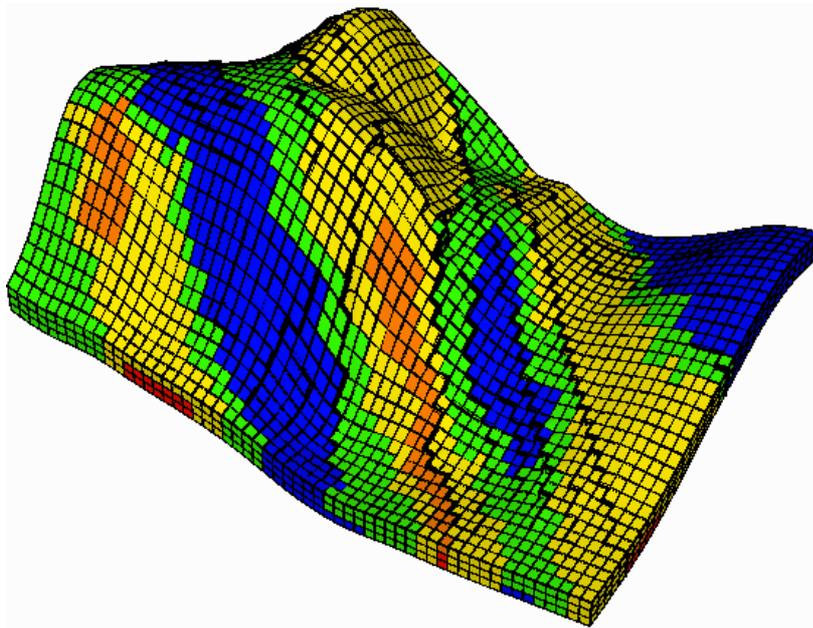


Figura 54. Modelo em 3D do mapa de porosidade do Reservatório 6

As propriedades desse modelo estão apresentadas na Tabela 8 abaixo.

Propriedade	Valor
Dimensões	33 I x 57 J x 3 K
Número de poços principais	10
Número de laterais esperadas	16
Espaço de busca em IJK	10^{151}
Espaço de busca total	10^{184}
Direção do poço principal desejado	Desconhecida

Tabela 8. Propriedade do reservatório 6.

Por fim, é utilizado o Reservatório 7, um modelo real marítimo da Bacia de Campos utilizado no trabalho (EMERICK 2009). Esse reservatório possui um elevado número de regiões nulas, além de pontos com restrições de volume poroso e espessura do bloco. Esse reservatório já possui dois poços perfurados, um injetor (*II*) e um produtor (*PI*), que serão considerados pelo simulador e não

podem ser alterados pelo algoritmo. A Figura 55 apresenta uma vista superior da primeira camada do Reservatório 7.

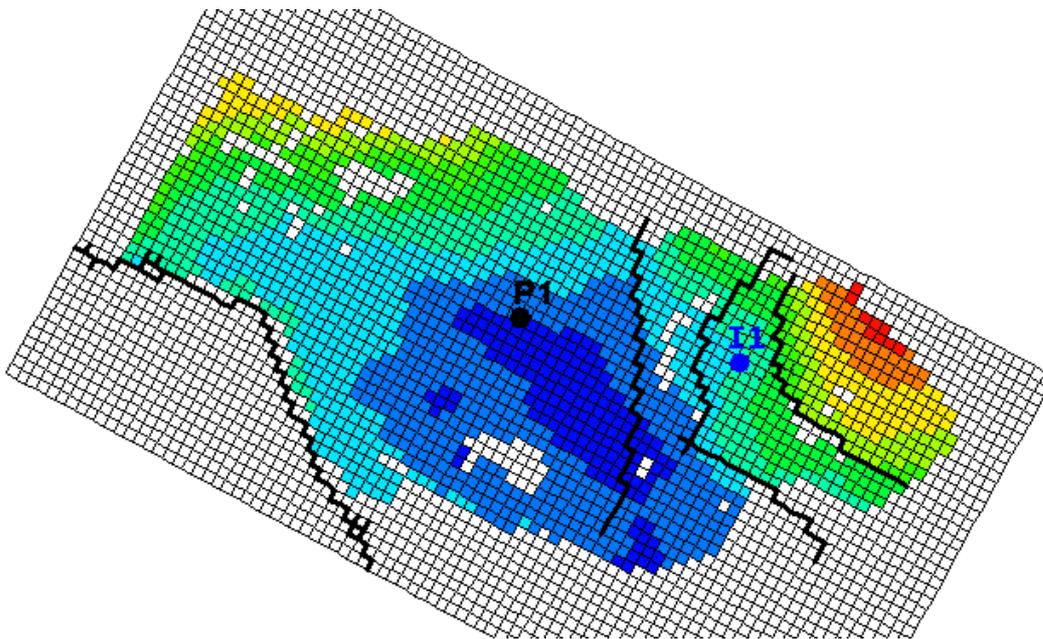


Figura 55. Vista superior da primeira camada do Reservatório 7.

As propriedades desse modelo estão apresentadas na Tabela 9 abaixo.

Propriedade	Valor
Dimensões	83 I x 45 J x 23 K
Número de Blocos Ativos	31.486
Número de poços principais	13
Número de laterais esperadas	20
Espaço de busca em IJK	10^{247}
Espaço de busca considerando apenas os blocos ativos	10^{227}
Espaço de busca total considerando apenas os blocos ativos	10^{271}
Direção do poço principal desejado	Desconhecida

Tabela 9. Propriedades do reservatório 7.

5.2. Testes Realizados

5.2.1. Comparativo Entre Representações

Foi conduzido um teste utilizando os quatro modelos de representação de cromossomo propostos. Para testar as representações foi utilizado o Reservatório 1. Os quatro modelos de AG's foram adaptados para não utilizar os genes de tipo de poço nem as máscaras, limitando o teste ao posicionamento do poço principal e suas laterais. Foram conduzidas cinco otimizações com cada modelo onde o

objetivo é analisar a capacidade dos algoritmos de encontrarem a posição dos poços principais e das laterais que cubra toda zona produtora. As evoluções utilizaram como função de avaliação a produção de óleo descontada no tempo, desconsiderando-se os custos de poços, investimentos e custos de produção. Os resultados foram classificados de acordo com a quantidade de zonas encontradas. A Figura 56 indica a nomenclatura das zonas 1, 2 e 3. A classificação é feita do seguinte modo: zona encontrada (poço possui mais de um bloco perfurado na zona) e zona otimizada (todos os blocos da zona foram perfurados). Com isso, foram preenchidas as tabelas Tabela 10 e Tabela 11 abaixo.

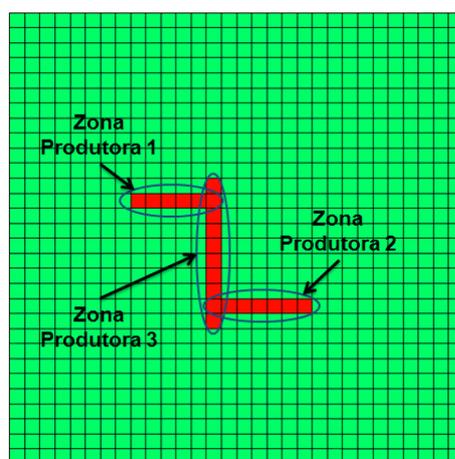


Figura 56. Zonas produtoras.

A tabela 10 possui a quantidade de vezes que uma dada representação encontrou uma zona ou otimizou uma zona.

	Zona 1 encontrada	Zona 1 otimizada	Zona 2 encontrada	Zona 2 otimizada	Zona 3 encontrada	Zona 3 otimizada
Representação 1	3	2	2	2	4	3
Representação 2	5	2	2	0	5	5
Representação 3	4	3	4	0	5	5
Representação 4	4	4	3	2	5	5

Tabela 10. Resultados da comparação entre representações.

A tabela 11 possui o resumo percentual de quantas vezes as zonas foram encontradas e otimizadas por cada representação, além de mostrar o percentual de vezes em que o ótimo foi encontrado, e o percentual do VPL médio encontrado por cada representação com relação ao VPL ótimo.

	Zonas encontradas	Zonas otimizadas	Ótimo	VPL normalizado
Representação 1	60%	47%	0%	75%
Representação 2	80%	47%	0%	83%
Representação 3	87%	53%	0%	86%
Representação 4	80%	73%	20%	91%

Tabela 11. Resultados gerais da comparação entre representações

Os parâmetros utilizados nas evoluções estão descritos na Tabela 12.

Parâmetro	Valor
Número de poços	1
Número de laterais	2
Número de indivíduos	100
Número de gerações	120
Número de simulações	6200
Comprimento máximo de poço	1000m
Controle de poço produtor STL	2000
Controle de poço produtor BHP	60
Controle de poço produtor WCUT	0.99

Tabela 12. Parâmetros das evoluções do Reservatório 1.

Com base nos resultados obtidos com os testes das diferentes representações propostas no Reservatório 1 pode-se perceber que todas as representações são capazes de identificar as zonas produtoras e otimizar ao menos uma zona produtora. Os resultados apresentados foram encontrados em cerca de 6500 simulações, lembrando que o espaço de busca é da ordem de 10^{16} , um número maior de simulações tende a gerar resultados melhores. A capacidade de cada representação de otimizar as zonas produtoras se mostrou diferente. A Representação 1, que consiste em todos os genes de posição em um único segmento, foi a representação que mostrou maiores problemas para localizar as zonas produtoras, localizando apenas uma ou duas zonas em cada solução. A Representação 2, que divide os genes que representam a posição do poço dos genes que representam a posição da lateral em duas populações distintas, levou a um aumento da capacidade do algoritmo de encontrar as zonas produtoras, embora ainda não seja capaz de otimizá-las eficientemente. A aplicação de coordenadas relativas nos genes que representam as laterais caracteriza a Representação 3. Com base nos resultados observados nas tabelas acima essa representação foi a com capacidade de encontrar as zonas produtoras, no entanto, continua apresentando certa dificuldade para otimizá-las, mesmo fazendo-o de modo mais eficientemente que as representações anteriores. A Representação 4 utiliza apenas uma população com os genes de poços principais em segmento

separado dos genes das laterais e as laterais são representadas de forma relativa, assim como na Representação 3. Essa representação foi a que mostrou maior eficiência, obtendo maior VPL. Essa representação, também, é a com a maior capacidade de otimizar as zonas produtoras encontradas.

5.2.2.

Validação da Representação Seleccionada

A representação seleccionada para conduzir os demais estudos de caso é a Representação 4. Esta representação foi testada com os reservatórios 2, 3, 4 e 5 com o objetivo de se verificar sua capacidade de otimizar configurações simples. A capacidade de encontrar a posição do poço principal foi testada e em seguida, foi testada a capacidade de se encontrar a posição do poço principal e de uma lateral. Para esse teste foram utilizadas todas as variáveis, fazendo com que o algoritmo evolua não somente a posição do poços como também o tipo do poço, o tipo da lateral, o índice de associação da lateral ao poço e se o poço principal deveria ser aberto ao fluxo ou não. Somente o número de poços principais foi fixado em 1, não utilizando a variável de máscara de poço.

Foram conduzidas dez otimizações para cada reservatório, além de mais uma série de dez otimizações para teste de tamanho da população. Como o número de variáveis é maior quando se busca a posição dos poços principais e das laterais, o tamanho da população para esses testes também deve ser maior.

As evoluções utilizaram como função de avaliação a produção de óleo descontada no tempo, desconsiderando-se os custos de poços, investimentos e custos de produção.

Os parâmetros utilizados para as evoluções estão descritos na Tabela 13.

Parâmetro	Valor
Número de poços	1
Número de gerações	40
Número de rodadas	4
Comprimento máximo de poço	1000m
Controle de poço produtor STL	2000
Controle de poço produtor BHP	60
Controle de poço produtor WCUT	0,99
Taxa de cruzamento	variando de 0,5 até 0,25
Taxa de mutação	variando de 0,07 até 0,2
Taxa <i>steady state</i>	0,5

Tabela 13. Parâmetros gerais para os reservatórios 2, 3, 4 e 5

Reservatório 2

Para o reservatório 2 foram utilizados, além dos valores da Tabela 13, os valores da Tabela 14.

Parâmetro	Valor
Número de laterais	0
Número de indivíduos	50
Número de simulações	3201
Tempo médio de simulação	0,73s
Tempo médio de otimização	32min

Tabela 14. Parâmetros da otimização do reservatório 2.

Os valores médios obtidos como resultado para o reservatório 2 estão exibidos na Tabela 15.

Resultado	Valor
Ótimos alcançados	50%
FR normalizado médio	87%
Avaliação normalizada média	87%

Tabela 15. Resultados do reservatório 2.

O gráfico que representa uma evolução que alcançou o ótimo é apresentado na Figura 57, onde cada ponto simboliza uma avaliação do AG. Uma linha contínua é utilizada para demonstrar o valor ótimo encontrado até o momento.

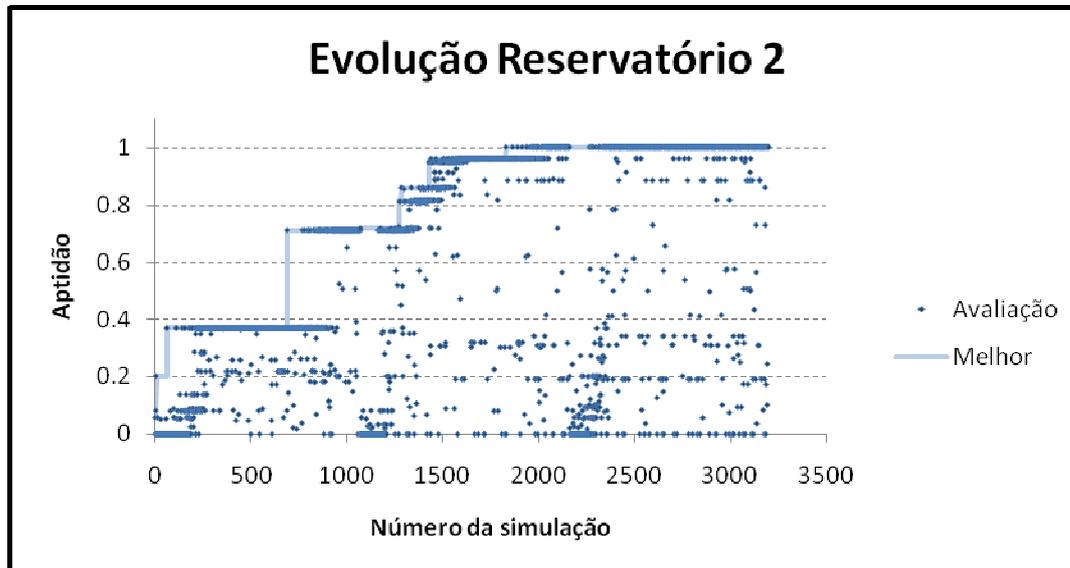


Figura 57. Evolução da melhor rodada com o reservatório 2

Reservatório 3

O reservatório 3 foi utilizado para o teste de tamanho da população, onde foram utilizados além dos valores da Tabela 13, os valores da Tabela 16.

Os valores médios obtidos como resultado para o reservatório 3 com os dois tamanhos de população estão exibidos na Tabela 17.

Parâmetro	Valor para 75 indivíduos	Valor para 100 indivíduos
Número de laterais (k)	2	2
Número máximo de laterais por poço	1	1
Número de indivíduos	75	100
Número de simulações	4747	6405
Tempo médio de simulação	0,72s	0,75s
Tempo médio de otimização	45min	1h e 1min

Tabela 16. Parâmetros da otimização do reservatório 3.

Resultado	Valor para 75 indivíduos	Valor para 100 indivíduos
Ótimos alcançados	10%	10%
FR normalizado médio	91%	91%
Avaliação normalizada média	83%	85%

Tabela 17. Resultados do reservatório 3

O gráfico que representa uma evolução que alcançou o ótimo em cada configuração de população é apresentado na Figura 58, onde cada ponto vermelho simboliza uma avaliação do AG com 75 indivíduos na população e cada ponto azul simboliza uma avaliação do AG com 100 indivíduos. Uma linha contínua é utilizada para demonstrar o valor ótimo encontrado até o momento.

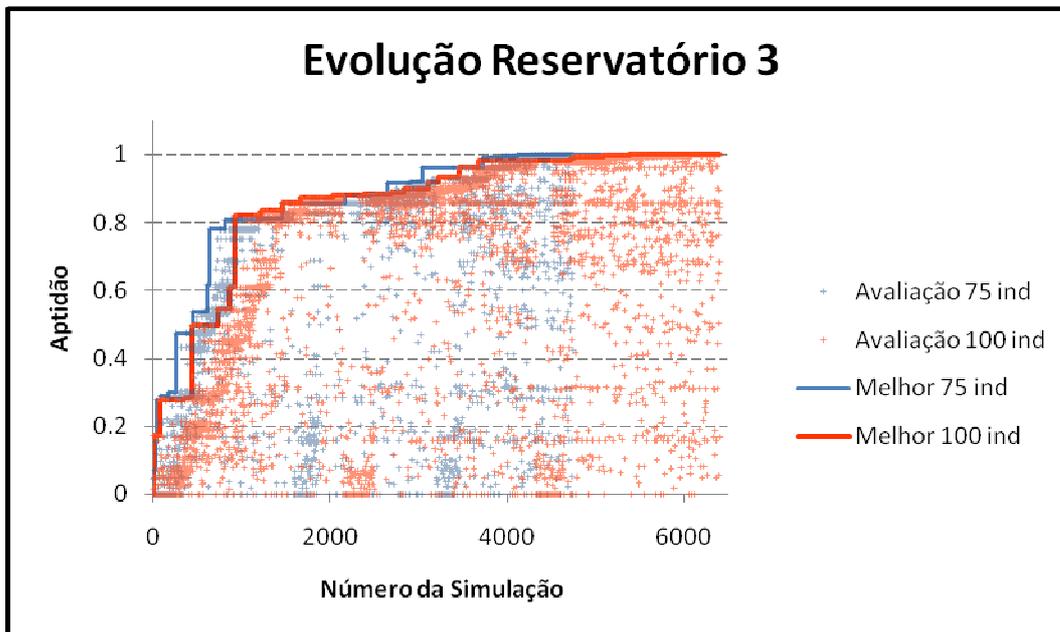


Figura 58. Evolução das melhores rodadas com o reservatório 3

Os indivíduos resultantes das evoluções apresentadas na Figura 58 se encontram na Figura 59 abaixo com sua decodificação no reservatório.

I	J	K	I	J	K	T	ρ	φ	θ	L	T	P	ρ	φ	θ	L	T	P	C	M
16	17	1	8	17	1	0	0.7	0	0.55	6	-0.4	1.4	0.35	4.75	1.5	6.85	-0.6	0.9	1	1

=

I	J	K	I	J	K	T	ρ	φ	θ	L	T	P	ρ	φ	θ	L	T	P	C	M
16	17	1	8	17	1	0	0	4.7	1.05	7.9	-0.55	0	0.5	3.6	0.45	6.6	-0.4	1.05	1	1

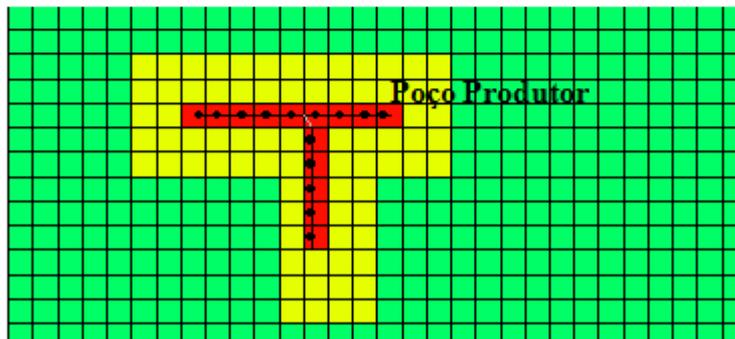


Figura 59. Cromossomos ótimos das melhores rodadas do Reservatório

3

Reservatório 4

Para o reservatório 4 foram utilizados, além dos valores da Tabela 13, os valores da Tabela 18.

Parâmetro	Valor
Número de laterais	0
Número de indivíduos	50
Número de simulações	3086
Tempo médio de simulação	1,17s
Tempo médio de otimização	1h e 22min

Tabela 18. Parâmetros da otimização do reservatório 4

Os valores médios obtidos como resultado para o reservatório 4 estão exibidos na Tabela 19.

Resultado	Valor
Ótimos alcançados	60%
FR normalizado médio	87%
Avaliação normalizada média	88%

Tabela 19. Resultados do reservatório 4

O gráfico que representa uma evolução que alcançou o ótimo é apresentado na Figura 60, onde cada ponto simboliza uma avaliação do AG. Uma linha contínua é utilizada para demonstrar o valor ótimo encontrado até o momento.

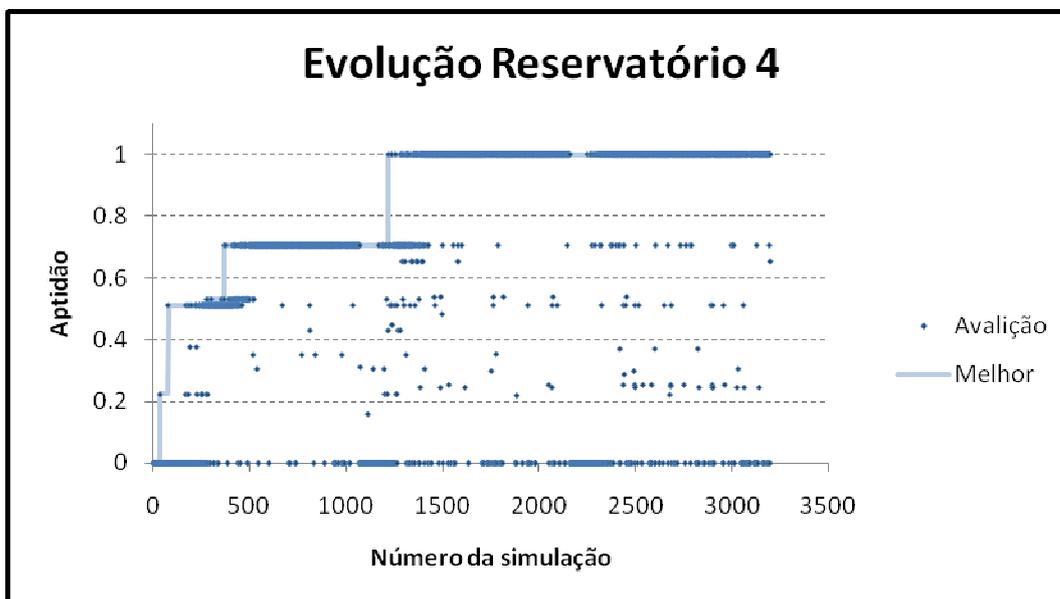


Figura 60. Evolução da melhor rodada com o reservatório 4

Reservatório 5

Para o reservatório 5 foram utilizados além dos valores da Tabela 13 os valores da Tabela 20. Buscando encontrar resultados com poços verticais, foi aplicada uma penalização em forma de maior custo (custo diferente de zero) para poços com inclinação maior de trinta graus.

Parâmetro	Valor
Número de laterais	2
Número máximo de laterais por poço	1
Número de indivíduos	100
Número de simulações	6398
Tempo médio de simulação	1,13s
Tempo médio de otimização	1h e 44min

Tabela 20. Parâmetros da otimização do reservatório 5

Os valores médios obtidos como resultado para o reservatório 5 estão exibidos na Tabela 21.

Resultado	Valor
Ótimos alcançados	80%
FR normalizado médio	98%
Avaliação normalizada média	99%

Tabela 21. Resultados do reservatório 5

O gráfico que representa uma evolução que alcançou o ótimo é apresentado na Figura 61, onde cada ponto simboliza uma avaliação do AG. Uma linha contínua é utilizada para demonstrar o valor ótimo encontrado até o momento.

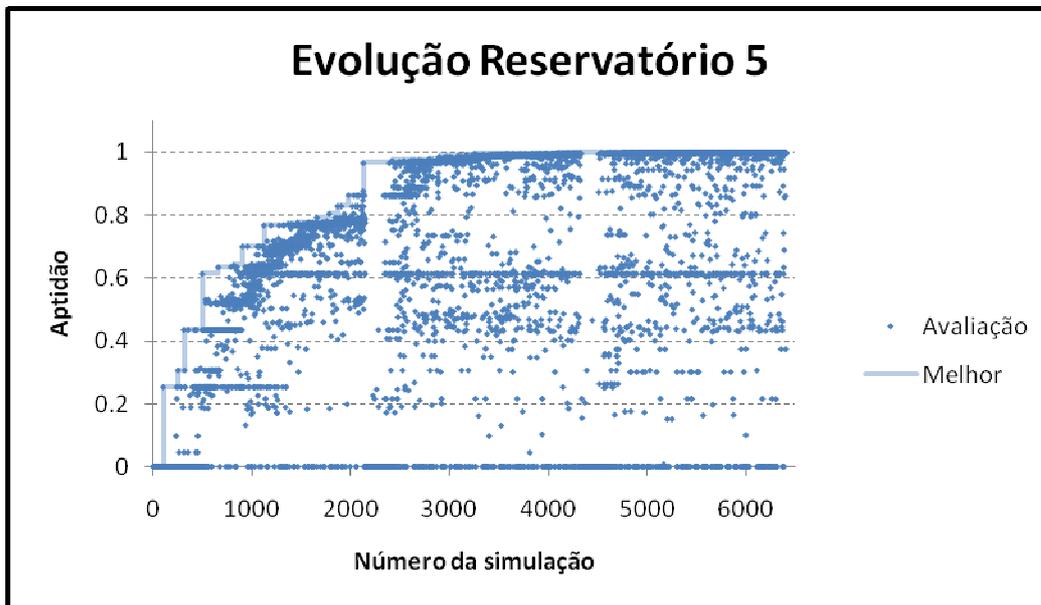


Figura 61. Evolução da melhor rodada com o reservatório 5

O indivíduo resultante da evolução apresentada na Figura 61 se encontra na Figura 62 abaixo com sua decodificação no reservatório.

I	J	K	I	J	K	T	ρ	φ	θ	L	T	P	ρ	φ	θ	L	T	P	C	M
7	18	3	7	18	1	0	0,15	0,15	1,15	9,2	-0,45	0,45	0,45	4,55	0,15	7,05	-0,3	1,5	1	1

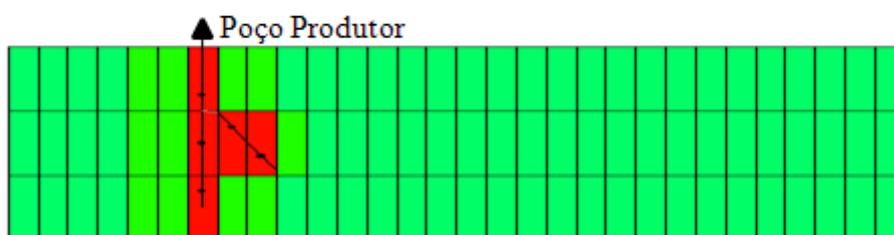


Figura 62. Cromossomo ótimo da melhor rodada do Reservatório 5

Considerações gerais

Dentre os resultados obtidos, um dos mais importantes é a porcentagem de ótimos encontrados. Esse valor representa o número de rodadas do AG em que o resultado encontrado representa um poço que possua completção em todos os blocos com alta concentração de óleo (em vermelho) e sem nenhuma completção nos demais blocos. Esse indicador demonstra a capacidade do AG desenvolvido

neste trabalho de encontrar a configuração ótima de poços para cada um desses modelos.

Como pode ser observado comparando os resultados obtidos para porcentagem de ótimos encontrados, com o mesmo tamanho de população, a dificuldade de se encontrar o ótimo aumenta com o número de blocos pertencentes à configuração ótima de poço. Considerando o tamanho dos espaços de busca, pode-se dizer que o sistema é capaz de encontrar o ótimo para os reservatórios 2, 4 e 5 com os parâmetros de otimização utilizados. O resultado de 10% (uma em dez) demonstra grande dificuldade para o algoritmo obter a configuração ótima para o Reservatório 3, embora esse ótimo tenha sido obtido tanto quando utilizando uma população com 75 indivíduos quanto com 100 indivíduos.

Como não se mostrou possível alcançar o ótimo global dos problemas em todas as otimizações, outras grandezas são utilizadas para medir a eficiência da otimização. Para isso foram utilizados os indicadores de fator de FR e fator VPL.

O fator de FR é a medida do FR (recuperação acumulada de óleo divididos pelo volume de óleo no reservatório) obtido por uma alternativa divididos pelo FR obtido pela alternativa ótima para o reservatório sendo testado.

Os valores médios obtidos para os quatro reservatórios acima foram maiores que 85%. O valor de FR médio obtido para cada reservatório simboliza o valor esperado ao se conduzir uma otimização com o AG proposto neste trabalho para o reservatório em questão. Isso significa que o modelo de otimização com AG proposto neste trabalho é capaz de propor alternativas que podem ou não ser ótimas para os reservatórios 2, 3, 4 e 5 e que o valor esperado do fator de recuperação de óleo para esses reservatório é maior que 85% do FR máximo para cada um deles.

O fator de VPL é semelhante ao fator de FR, onde a diferença é que o VPL considera quando o óleo foi recuperado, valorizando produzir mais óleo em um futuro próximo do que em um futuro distante.

Os valores médios obtidos nos quatro reservatórios acima também se mostram satisfatórios, indicando que o sistema é capaz de propor alternativas que geram bons retornos financeiros tendendo ao retorno máximo do reservatório.

O motivo pelo qual não é possível se buscar todas as combinações de variáveis possíveis para se obter as configurações de poços ótimas é o tempo de

simulação necessário para tal. Quanto mais tempo se tenha para resolver o problema de alocação de poços por AG melhor deve ser o resultado. O tempo de simulação apresentado acima é o tempo de processamento médio necessário para cada simulação do reservatório. O uso de paralelismo pode reduzir esses tempos. Um maior tempo de simulação resulta em um maior tempo para a otimização. Comparando os resultados acima, pode-se perceber que o tempo de simulação aumenta com o aumento do número de blocos no reservatório.

Quando se pretende otimizar um reservatório, estima-se um tempo que se está disposto a esperar pela solução e, com base no tempo de simulação, estima-se o número de simulações a serem conduzidas. Com um número de simulações estipulado determina-se o tamanho da população e número de gerações, onde um maior tamanho de população propicia a exploração e um maior número de gerações propicia a exploração.

Para a otimização dos reservatórios 3 e 5 foi utilizado um número maior de simulações, isso porque o problema a ser resolvido é mais complexo e possui mais variáveis. Optou-se por aumentar o tamanho da população para aumentar a probabilidade de se encontrar as duas zonas produtoras em cada reservatório. Pode ser observado o aumento no número de simulações e no tempo de otimização nas tabelas: Tabela 14 e Tabela 16, de forma quase linear.

Analisando o gráfico da Figura 58, pode-se observar que a curva em azul, que representa uma evolução com 75 indivíduos na população, alcança o ótimo em menos simulações que a linha vermelha, que representa uma evolução com 100 indivíduos na população. No entanto, o fator de VPL médio encontrado para a evolução com 100 indivíduos é dois pontos percentuais maior que o da evolução com 75 indivíduos, indicando que os resultados não ótimos obtidos pelas evoluções com 100 indivíduos foram melhores que os obtidos pelas evoluções com 75 indivíduos. Isso se dá pela maior facilidade de um AG com mais indivíduos de não convergir para mínimos locais. No caso do Reservatório 3, 60% das soluções encontradas utilizando 75 indivíduos possuíam o poço principal sobre o segmento mais curto de óleo (onde está alocada a lateral na Figura 59) o que é um ótimo local, enquanto apenas 20% das soluções encontradas utilizando 100 indivíduos convergiram para essa configuração.

Uma observação sobre os resultados obtidos durante esses experimentos é o surgimento de linhas nos gráficos de evolução, mais acentuadas nas figuras:

Figura 58 (em 0,86) e Figura 61 (em 0,6). Essas linhas simbolizam ótimos locais onde vários indivíduos tendem a atingir ao longo da evolução. E esses ótimos locais estão ilustrados na Figura 63 e Figura 64 respectivamente.

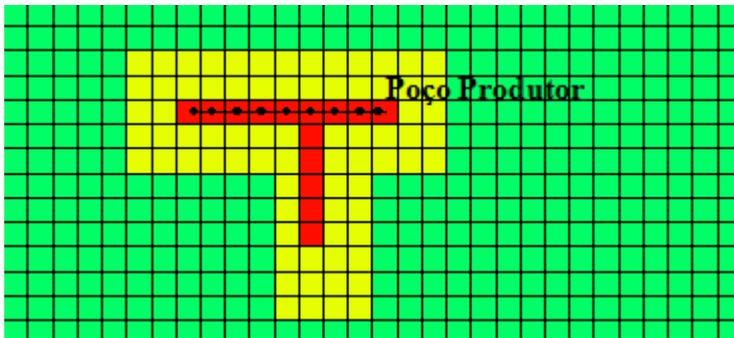


Figura 63. Ótimo local durante a evolução do Reservatório 3

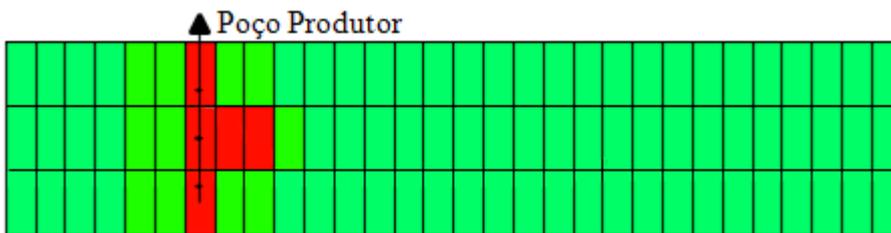


Figura 64. Ótimo local durante a evolução do Reservatório 5

Durante a análise dos resultados foi observado que durante a evolução da Figura 61, realizada no reservatório 5, o indivíduo ilustrado na Figura 65 foi encontrado como melhor indivíduo da população. Caso se estivesse utilizando a co-evolução, esta não seria capaz de encontrar o ótimo para este problema, pois não seria possível “inverter” a posição do poço principal com a lateral. Para isso é necessário se modificar o gene indicativo da posição inicial em I e o gene indicativo de ângulo da lateral em torno do poço principal φ simultaneamente. Nessa evolução, essa modificação foi encontrada e foi dada continuidade a evolução.

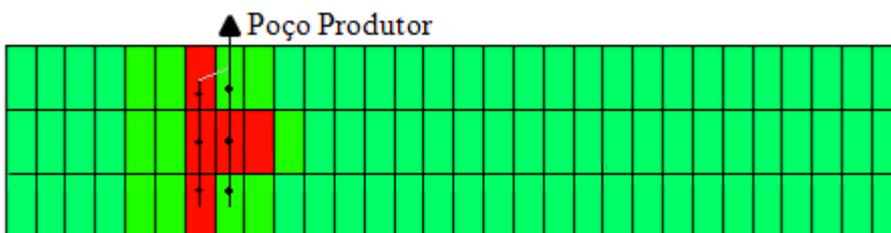


Figura 65. Melhor indivíduo da geração 13 da evolução do Reservatório

5.2.3. Testes com Modelo Heterogêneo

Comparativo da evolução com e sem laterais

Um reservatório heterogêneo sem ótimo conhecido, chamado de Reservatório 6, foi utilizado para prosseguir os testes com o modelo quatro de representação do cromossomo. Foram executadas 10 otimizações utilizando laterais e 10 sem utilizar laterais. Os parâmetros utilizados nessas otimizações se encontram descritos na Tabela 22. O número de simulações utilizadas para os dois casos foi o mesmo, embora o número de genes a serem otimizados seja diferente.

Parâmetro	Valor para sem laterais	Valor para com laterais
Número de laterais	0	16
Número máximo de laterais por poço	0	4
Número máximo de poços	10	10
Número de genes	90	186
Número de indivíduos	100	100
Número de gerações	40	40
Número de rodadas	3	3
Número de simulações	6409	6410
Tempo médio de simulação	12,4s	11,9s
Tempo médio de otimização	23h 22min	24h 17min
Comprimento máximo de poço	1000m	1000m
Controle de poço produtor STL	3000	3000
Controle de poço produtor BHP	55	55
Controle de poço produtor WCUT	0,99	0,99
Controle de poço injetor STW	3000	3000
Controle de poço injetor BHP	450	450
Taxa de cruzamento	variando de 0,5 até 0,25	variando de 0,5 até 0,25
Taxa de mutação	variando de 0,07 até 0,2	variando de 0,07 até 0,2
Taxa <i>steady state</i>	0,5	0,5

Tabela 22. Parâmetros de teste com e sem laterais no Reservatório 6.

Os resultados obtidos pela média das dez otimizações de cada configuração estão expressos na Tabela 23.

Resultado	Sem Laterais	Com Laterais
Número de Poços	7,5	7,1
Óleo acumulado médio	19754620 m ³	20071140 m ³
Gás acumulado médio	227672900 m ³	231267600 m ³
Água acumulada média	39084940 m ³	40778590 m ³
FR médio	38,9%	39,6%
VPL médio	US\$1.339.285.634,00	US\$1.312.776.235,00
Coefficiente de variação \bar{x}/σ	0,042	0,041

Tabela 23. Resultados de teste com e sem laterais no Reservatório 6.

O Reservatório 6 não possui as características descritas no capítulo 2 deste trabalho como os motivos pelo qual se justificaria o uso de multilaterais, além de

ser um campo marítimo, sendo assim, este teste visa indicar se haveriam ganhos significativos com o uso de poços multilaterais e se é vantajoso o ganho de VPL dado pelos poços multilaterais em contraposição com o número extras de variáveis a serem otimizadas, além de testar, como um todo, a capacidade do sistema de trabalhar com malhas mais complexas que a dos reservatórios anteriores.

Nos resultados obtidos na Tabela 23 pode-se observar que o VPL e FR médios obtidos foram semelhantes, as variações foram de menos de um desvio padrão. Devido ao tempo limitado para a otimização, nenhum dos resultados atingiu o VPL máximo do reservatório, e esse ótimo continua desconhecido, não sendo possível se avaliar quão próximo ao ótimo cada solução chegou. O algoritmo foi capaz de encontrar soluções semelhantes utilizando o mesmo número de simulações para evoluções utilizando poços multilaterais, que possui o dobro do número de variáveis, e sem utilizar as laterais. Nenhuma das 10 soluções geradas com a liberdade de se incluir laterais gerou uma alternativa que não possuísse ao menos um poço multilateral. Os resultados indicam que o uso de laterais favorece a busca por soluções de melhor VPL, compensando o aumento do tamanho do problema a ser resolvido. De forma geral, a avaliação desse estudo com relação à utilização de laterais para o Reservatório 6 é inconclusiva, devido a proximidade dos resultados obtidos. Considerações externas às avaliadas neste trabalho determinariam qual a melhor estratégia a ser aplicada no reservatório, entretanto o sistema se mostrou capaz de sugerir alternativas com ambas as estratégias.

Comparação com caso base

Para o Reservatório 6 tem-se uma solução gerada por um engenheiro de reservatório, sendo tratada aqui como um caso base que se propõe a superar. Essa solução não utiliza poços multilaterais, então, por motivos de comparação será utilizada, aqui, a melhor alternativa gerada para o Reservatório 6 sem o uso de laterais.

A Figura 66 ilustra o posicionamento dos poços do caso base e alternativa otimizada. Em preto estão ilustrados os poços produtores e em azul os poços injetores. A propriedade do reservatório sendo observada é a porosidade, onde o azul indica baixa porosidade e o amarelo indica alta porosidade.

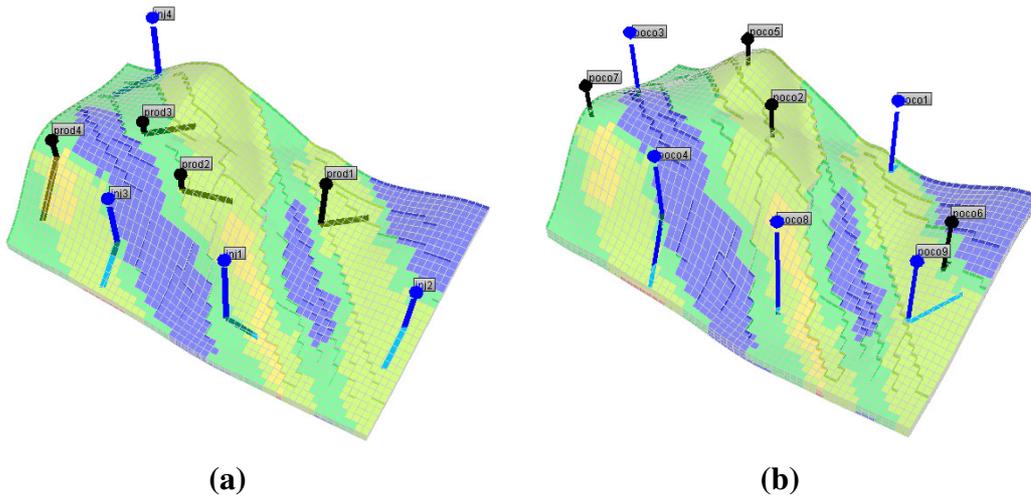


Figura 66. Vista 3D do caso base (a) e da alternativa otimizada (b)

Ao comparar o posicionamento dos poços da Figura 66 (a) e (b), pode-se observar que a estratégia de exploração é semelhante. A alternativa otimizada possui um injetor a mais e os demais poços foram rearranjados entre as faixas de baixa permeabilidade. Vale ressaltar que, apesar das configurações parecerem similares, a alternativa otimizada não utilizou nenhuma informação do caso base para a inicialização da população nem durante a evolução. Características relevantes quanto aos poços otimizados incluem o uso de poços verticais e curtos para maioria dos poços, o cálculo da função de avaliação (VPL) leva em consideração o comprimento do poço para cobrar o tempo extra de sonda, levando a minimização dos comprimentos.

A Tabela 24 apresenta uma comparação numérica dos resultados obtidos, enquanto a Figura 67 ilustra graficamente a produção acumulada de óleo no tempo, a taxa de produção de óleo e a fração de água produzida (*water cut*) no tempo. Em vermelho se encontram as curvas do caso base e em azul as curvas da alternativa otimizada.

	Caso Base	Alternativa Otimizada	Variação
Número de Poços	8	9	+1
VPL	US\$1.159.661.274,00	US\$1.558.308.529,00	34%
Óleo Acumulado	17848100 m ³	22224500 m ³	25%
Gás Acumulado	205703000 m ³	256040000 m ³	24%
Água Acumulada	41054300 m ³	65821100 m ³	60%
FR	35,2%	43,8%	24%

Tabela 24. Comparação caso base com alternativa otimizada para o Reservatório 6.

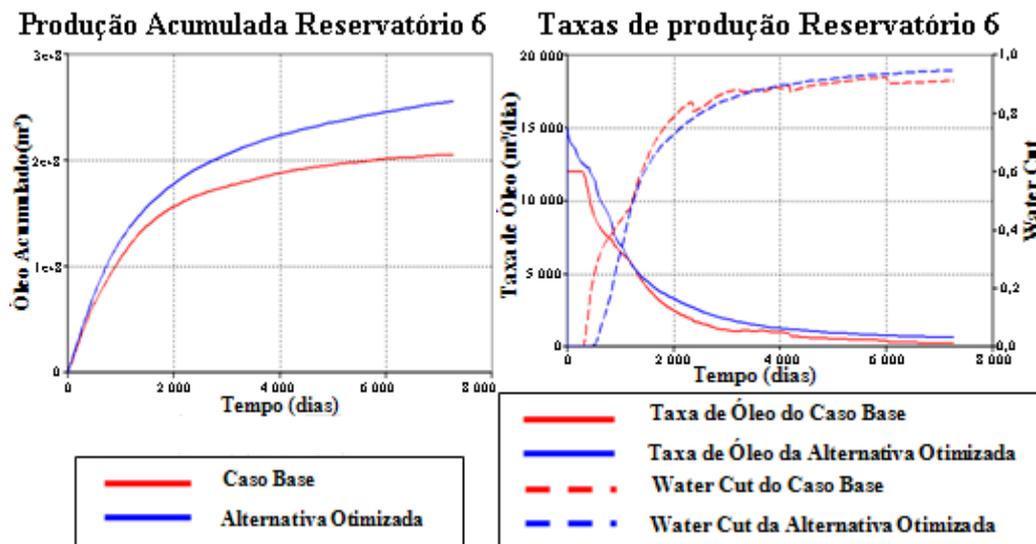


Figura 67. Curvas de produção para o caso base e alternativa otimizada para o Reservatório 6.

Os resultados obtidos indicam um aumento de 34% no VPL e de 24% no FR. A adição de um poço injetor e o rearranjo dos poços promoveu uma elevação da pressão do reservatório permitindo a maior vazão de produção por mais tempo. Pela curva de *water cut* é possível constatar que o posicionamento dos poços é tal que atrasa a chegada da frente de água, mesmo com mais água sendo injetada no reservatório. Como o tempo é levado em consideração no cálculo do VPL o AG tende a gerar soluções que aumentem as receitas em tempos próximos e diminua as despesas em períodos próximos, ambas as características podem ser observadas nas curvas de produção, com maior diferença da taxa de produção de óleo no início da exploração e menor taxa de água, favorecendo economicamente essa alternativa e justificando o maior aumento do VPL do que o FR mesmo com custos mais elevados de instalações de poços e maior produção e injeção de água.

Comparação com Trabalhos Anteriores

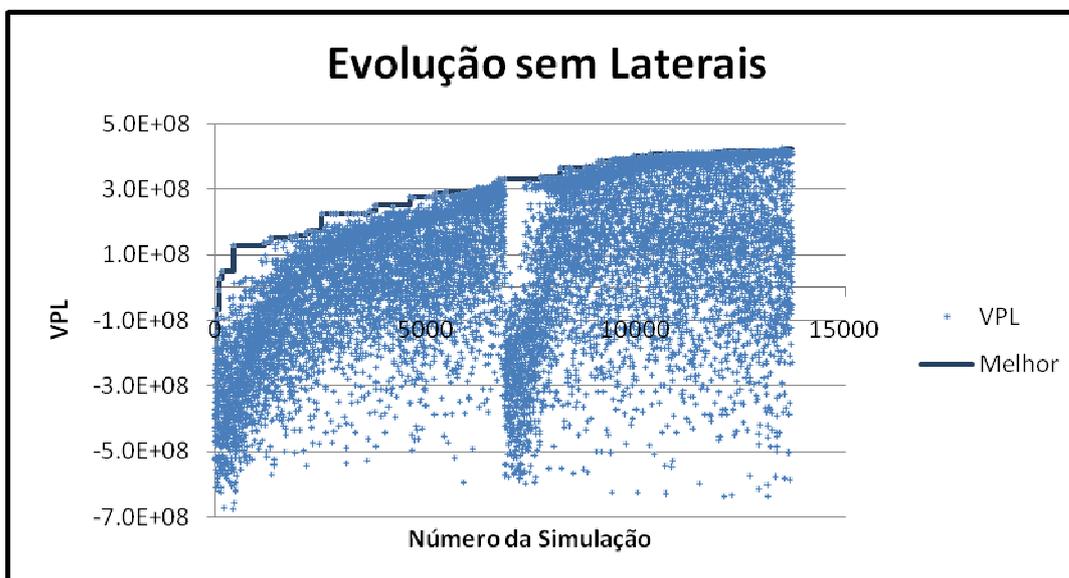
Um reservatório com o mesmo *grid*, porém com características ligeiramente diferentes do Reservatório 6, foi utilizado em (TÚPAC 2005) onde foram conduzidos diversos testes com e sem metodologias de auxílio à evolução, como uso de semente inicial e mapa de qualidade. Para este teste foi utilizado o mesmo reservatório que o utilizado por (TÚPAC 2005), assim como os mesmos parâmetros de VPL e número de simulações. A principal diferença é a utilização de poços direcionais e multilaterais, o que aumenta a liberdade do algoritmo de

utilizar um conjunto maior de tipos de poços, no entanto, tem-se um espaço de busca maior. Os parâmetros utilizados foram os definidos na Tabela 25.

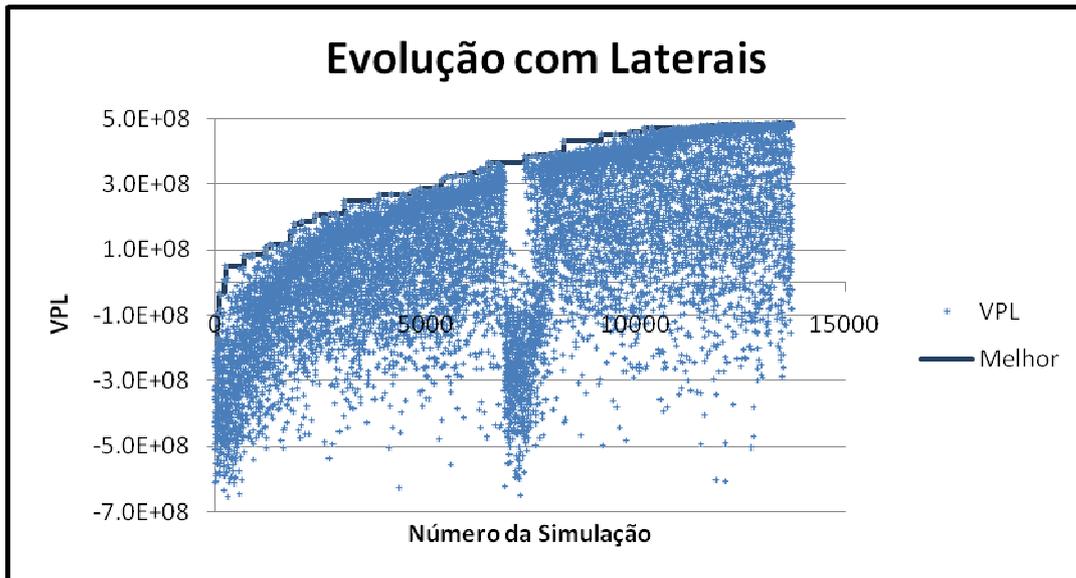
Parâmetro	Valor para sem laterais	Valor para com laterais
Número de laterais	0	16
Número máximo de laterais por poço	0	4
Número máximo de poços	10	10
Número de genes	90	186
Número de indivíduos	260	260
Número de gerações	50	50
Número de rodadas	2	2
Tempo médio de simulação	9,59s	10,5s
Tempo médio de otimização	24h 32min	1dia 4h 25min
Comprimento máximo de poço	1500m	1500m
Controle de poço produtor STL	3000	3000
Controle de poço produtor BHP	55	55
Controle de poço injetor STW	3000	3000
Controle de poço injetor BHP	450	450
Taxa de cruzamento	variando de 0,5 até 0,25	variando de 0,5 até 0,25
Taxa de mutação	variando de 0,07 até 0,2	variando de 0,07 até 0,2
Taxa <i>steady state</i>	0,5	0,5

Tabela 25. Parâmetros utilizados para comparação com (TÚPAC 2005).

As curvas de evolução e soluções propostas com e sem laterais se encontram na Figura 78 e na Figura 69 respectivamente, onde os poços produtores estão em preto e os injetores em azul. As alternativas obtidas em (TÚPAC 2005) se encontram na Figura 70.



(a)



(b)

Figura 68. Curvas de evolução sem laterais (a) e com laterais (b).

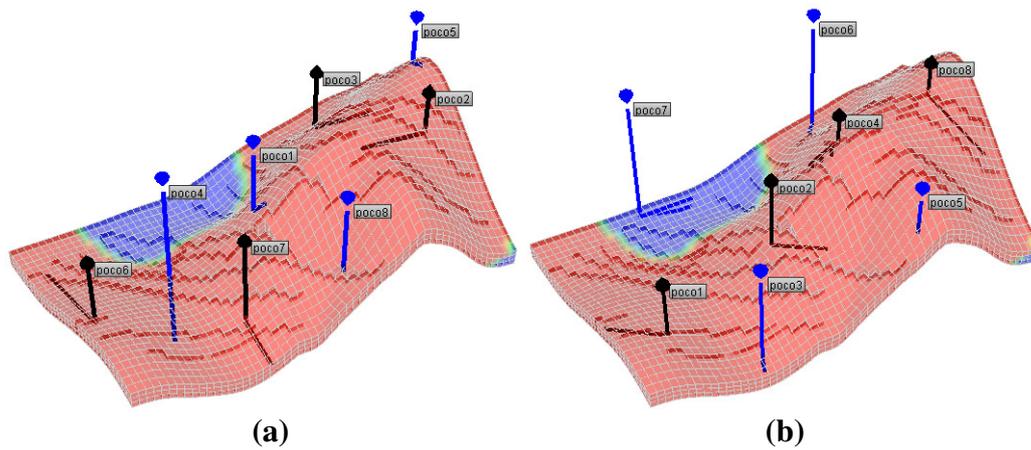


Figura 69. Vista 3D das alternativas otimizadas sem laterais (a) e com laterais (b).

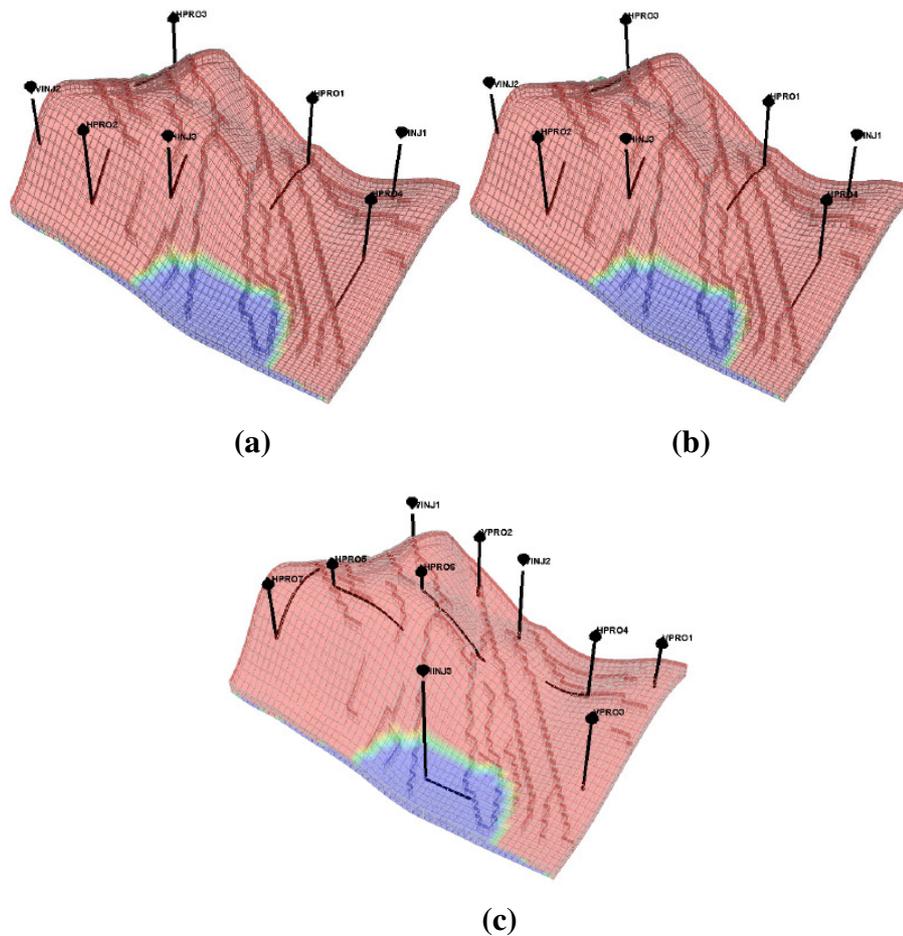


Figura 70. Vista 3D das alternativas de (TÚPAC 2005). Solução sem semente inicial (a), solução com semente inicial (b) e solução com mapa de qualidade (c).

Os resultados numéricos obtidos estão ilustrados na Tabela 26, enquanto as curvas comparativas se encontram na Figura 71.

	Número de Poços	Óleo Acumulado (m³)	VPL (US\$)	Ganho de VPL
TÚPAC sem semente inicial	7	22401310	340.840.442,88	0%
TÚPAC com semente inicial	7	22544399	346.633.395,80	2%
TÚPAC com mapa de qualidade	10	25708246	391.387.243,00	15%
Alternativa otimizada sem laterais	8	23349200	423.622.470,16	24%
Alternativa otimizada com laterais	8	25299600	485.057.047,00	42%

Tabela 26. Resultados para comparação com (TÚPAC 2005).

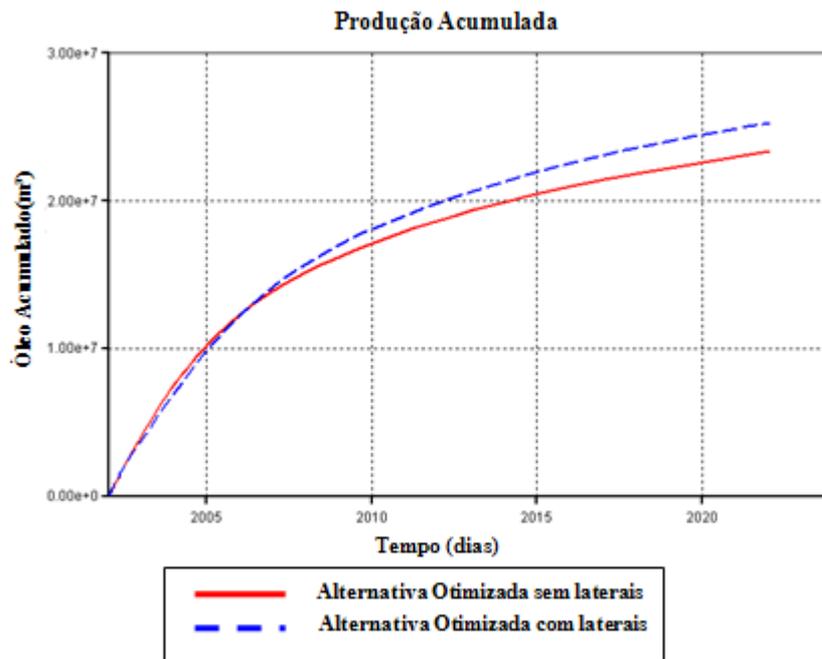


Figura 71. Curvas de produção para comparação com (TÚPAC 2005).

Pode-se observar que o modelo deste trabalho obteve resultados significativamente superiores quando comparados com as evoluções iniciadas aleatoriamente e ligeiramente superiores aos valores obtidos em (TÚPAC 2005) utilizando mapas de qualidade e sementes iniciais com, aproximadamente, o mesmo número de simulações. Em (TÚPAC 2005) foram utilizadas somente poços verticais e horizontais, não sendo possível para esse algoritmo gerar os resultados propostos neste trabalho, caracterizando uma vantagem de se trabalhar com um algoritmo mais genérico, capaz de trabalhar com mais graus de liberdade. Ao se comparar os resultados utilizando poços multilaterais observa-se um ganho substancial de VPL, demonstrando, assim, mais uma vez, a vantagem de se trabalhar com sistemas que sejam capazes de trabalhar com mais variáveis.

5.2.4. Testes com Modelo Real

Comparação com caso base

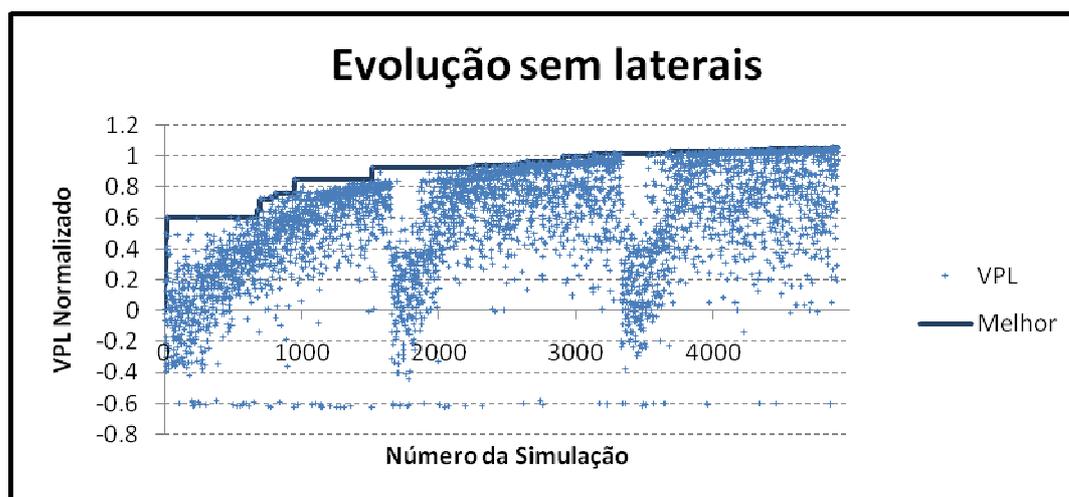
Após testes com modelos sintéticos utilizou-se um reservatório real para testar a capacidade do sistema de otimizar um grande número de variáveis em um grande espaço de busca. Para esse reservatório tem-se uma solução proposta por um especialista chamada de caso base. Foi executada uma otimização sem utilizar laterais e uma otimização permitindo o uso de poços com laterais. Foram conduzidos testes com e sem o uso de laterais pois a solução proposta pelo

especialista não contempla poços multilaterais, sendo assim, a otimização foi conduzida de duas formas por motivos de comparação. Os parâmetros utilizados para as duas evoluções se encontram na Tabela 27. Devido tempo de simulação foi utilizado o distribuidor de tarefas StarWeb utilizando 14 núcleos para processar 14 diferentes alternativas ao mesmo tempo.

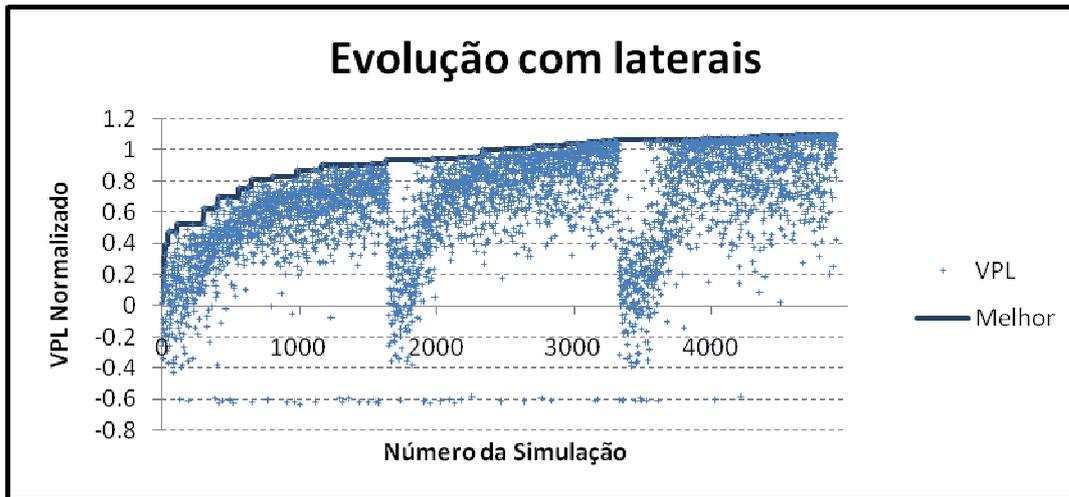
Parâmetro	Valor para sem laterais	Valor para com laterais
Número de laterais	0	20
Número máximo de laterais por poço	0	4
Número máximo de poços	13	13
Número de genes	117	237
Número de indivíduos	100	100
Número de gerações	30	30
Número de rodadas	3	3
Tempo médio de simulação	314s	350s
Tempo médio de otimização	4dias 14h 37min 12s	4dias 23h 40min 19s
Comprimento máximo de poço	1000 m	1000 m
Controle de poço produtor STL	1800 m ³ std/d	1800 m ³ std/d
Controle de poço produtor BHP	180 kgf/cm ²	180 kgf/cm ²
Controle de poço produtor WCUT	0,95	0,95
Controle de poço injetor STW	3000 m ³ std/d	3000 m ³ std/d
Controle de poço injetor BHP	350 kgf/cm ²	350 kgf/cm ²
Taxa de cruzamento	variando de 0,5 até 0,25	variando de 0,5 até 0,25
Taxa de mutação	variando de 0,07 até 0,2	variando de 0,07 até 0,2
Taxa <i>steady state</i>	0,5	0,5

Tabela 27. Parâmetros da otimização do Reservatório 7

O gráfico indicando o resultado, normalizado em função do caso base, de todas as simulações das evoluções sem laterais e com laterais se encontram na Figura 72.



(a)



(b)

Figura 72. Evoluções do Reservatório 7. Sem a opção de laterais (a). Com a opção de laterais (b).

Os resultados das otimizações estão expressos na Tabela 28 como função dos valores do caso base.

	Simulações	Número de Poços	Óleo Acumulado Normalizado	VPL Normalizado
Caso Base	-	15	1	1
Alternativa otimizada sem laterais	4908	12	1,098	1,058
Alternativa otimizada com laterais	4908	13	1,092	1,101

Tabela 28. Resultados da comparação com caso base do Reservatório 7.

Um comparativo entre a curva de produção das três alternativas se encontra na Figura 73, onde o caso base é apresentado em vermelho e as alternativas otimizadas são representadas em azul (sem utilizar poços multilaterais) e em verde (sem restrição quanto ao uso de poços multilaterais).

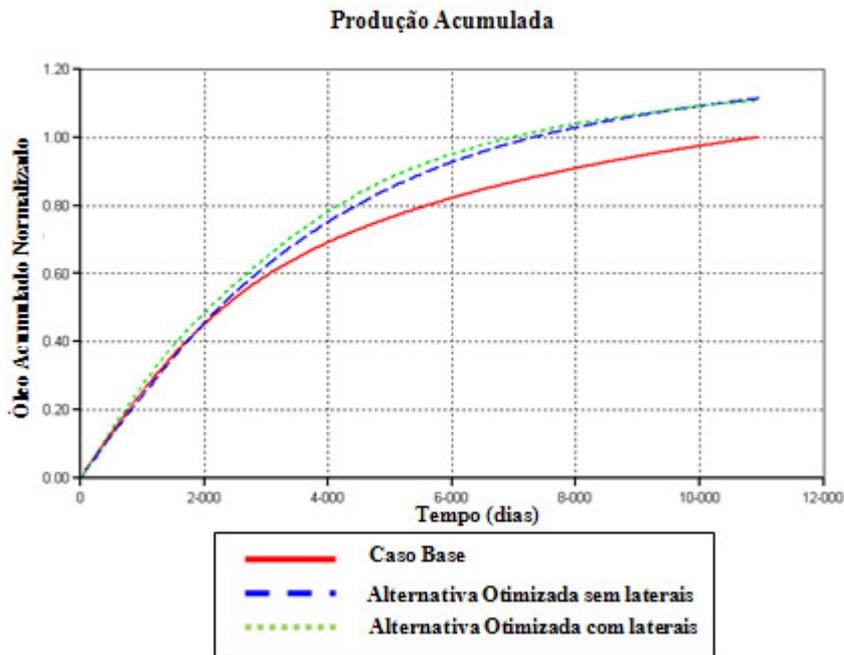
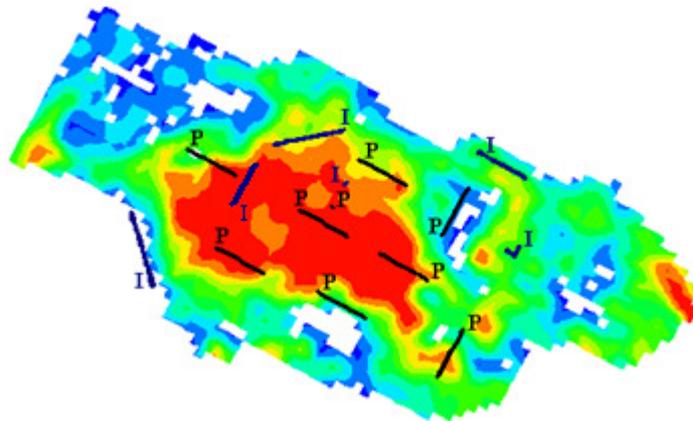


Figura 73. Resultados gráfico da produção de óleo das alternativas do Reservatório 7

As alternativas estão ilustradas na Figura 74 como uma projeção dos poços na primeira camada do reservatório. Os poços produtores estão marcados em preto e os injetores em azul.



(a)

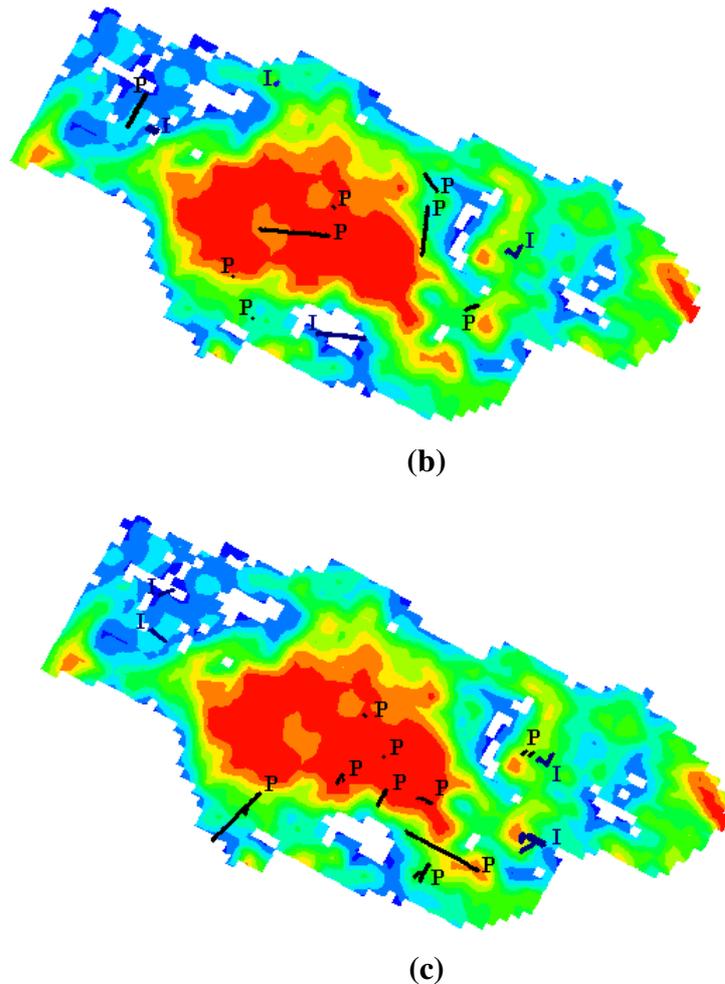


Figura 74. Projeções das alternativas no reservatório. Caso base (a), sem laterais (b), com laterais (c)

Analisando os resultados obtidos pode-se observar um aumento na quantidade de óleo produzido e no VPL quando comparando as alternativas otimizadas ao caso base. Pode-se observar que ambas as alternativas otimizadas alcançaram maiores produções de óleo com um menor número de poços, isso caracteriza um posicionamento mais eficiente dos poços e uma economia refletida no VPL. Pode-se observar, ainda, que a alternativa otimizada com poços multilaterais antecipa parte de sua produção, o que leva a um aumento de VPL, quando comparada com a otimização sem laterais.

Analisando os gráficos de evolução é possível observar que as evoluções alcançam o VPL do caso base em 3098 e 2327 simulações nas evoluções sem e com o uso de laterais respectivamente, indicando que a busca com laterais se dá de modo mais rápido, analisando os gráficos pode-se observar que também é mais suave, alcançando novos ótimos com mais frequência e com saltos menores.

Analisando as imagens das alternativas otimizadas é possível observar que ambas as alternativas otimizadas tendem a gerar poços mais curtos e verticais, minimizando os custos de desenvolvimento.

Comparação com trabalhos anteriores

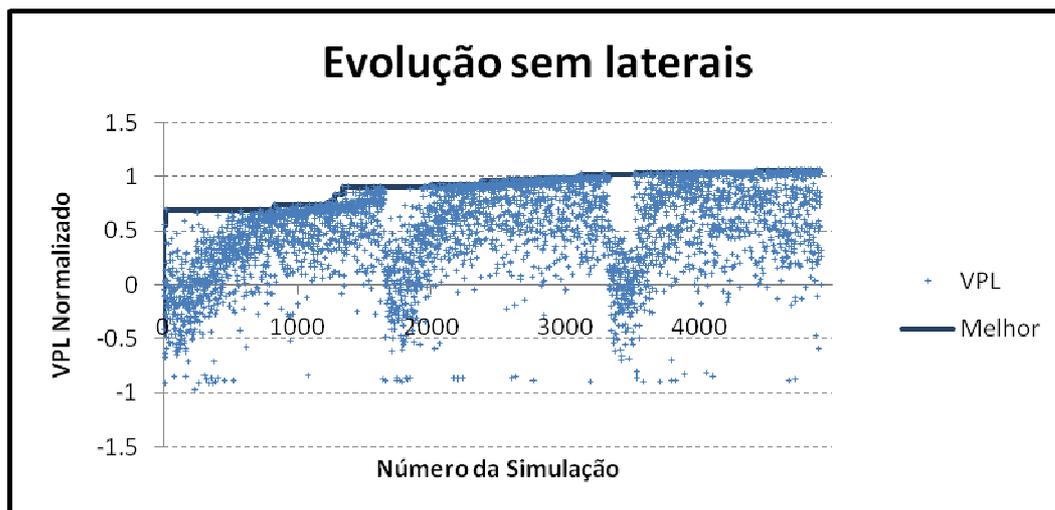
Como esse reservatório foi utilizado em (EMERICK 2009) é possível se comparar os resultados obtidos por esse sistema com os obtidos no artigo. Para isso foram conduzidas duas novas otimizações utilizando apenas os parâmetros de VPL considerados no artigo, por exemplo, ao se utilizar apenas os parâmetros considerados no artigo, não foi utilizado o custo por metro de poço perfurado para essas evoluções. Por motivos de comparação, buscou-se também manter o mesmo número de simulações que no artigo e, pelo mesmo motivo, se repetiu a otimização sem e com a utilização de poços com laterais.

Os parâmetros utilizados para as duas evoluções se encontram na Tabela 29. Devido ao tempo de simulação foi utilizado o distribuidor de tarefas StarWeb utilizando 14 núcleos para processar 14 diferentes alternativas ao mesmo tempo.

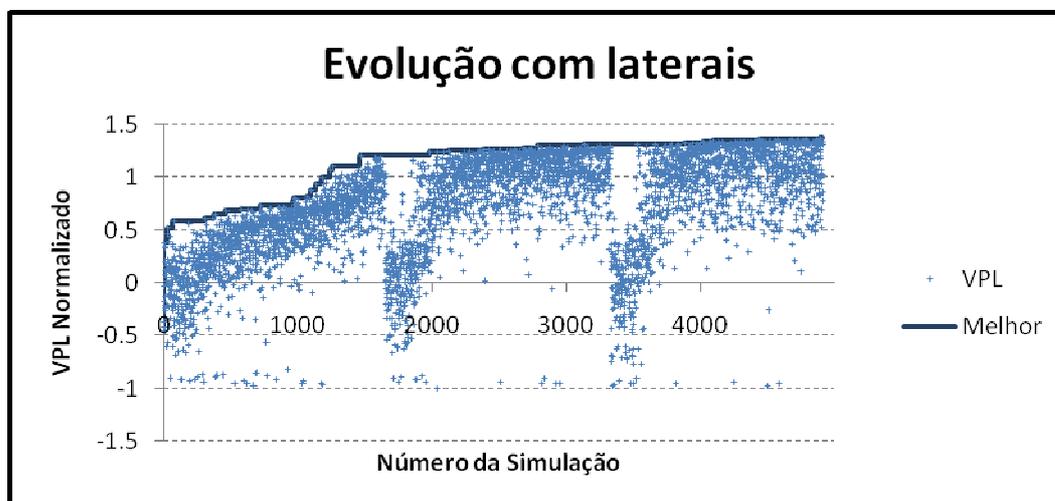
Parâmetro	Valor para sem laterais	Valor para com laterais
Número de laterais	0	20
Número máximo de laterais por poço	0	4
Número máximo de poços	13	13
Número de genes	117	237
Número de indivíduos	100	100
Número de gerações	30	30
Número de rodadas	3	3
Tempo médio de simulação	545s	581s
Tempo médio de otimização	4dias 14h 37min 12s	5dias 6h 52min 43s
Comprimento máximo de poço	1000 m	1000 m
Controle de poço produtor STL	1800 m ³ std/d	1800 m ³ std/d
Controle de poço produtor BHP	180 kgf/cm ²	180 kgf/cm ²
Controle de poço produtor WCUT	0,95	0,95
Controle de poço injetor STW	3000 m ³ std/d	3000 m ³ std/d
Controle de poço injetor BHP	350 kgf/cm ²	350 kgf/cm ²
Taxa de cruzamento	variando de 0,5 até 0,25	variando de 0,5 até 0,25
Taxa de mutação	variando de 0,07 até 0,2	variando de 0,07 até 0,2
Taxa <i>steady state</i>	0,5	0,5

Tabela 29. Parâmetros utilizados para comparação com soluções alcançadas em (EMERICK 2009).

O gráfico indicando o resultado, normalizado em função do caso base, de todas as simulações das evoluções sem laterais e com laterais se encontram na Figura 75.



(a)



(b)

Figura 75. Evoluções do Reservatório 7 com parâmetros modificados. Sem a opção de laterais (a). Com a opção de laterais (b).

Os resultados das otimizações estão expressos na Tabela 30 como função dos valores do caso base.

Um comparativo entre a curva de produção do caso base e das alternativas otimizadas se encontra na Figura 76, onde o caso base é apresentado em vermelho e as alternativas otimizadas são representadas em azul (sem utilizar poços multilaterais) e em verde (sem restrição quanto ao uso de poços multilaterais).

As alternativas otimizadas e o caso base estão ilustradas na Figura 77 como uma projeção dos poços na primeira camada do reservatório. Os poços produtores estão marcados em preto e os injetores em azul.

	Simulações	Número de Poços	Óleo Acumulado Normalizado	VPL Normalizado
Caso Base	-	15	1	1
Otimizada 1 (com semente inicial (EMERICK 2009))	4209	14	1,130	1,282
Otimizada 2 (sem semente inicial (EMERICK 2009))	4893	15	1,065	1,199
Alternativa otimizada sem laterais	4910	11	1,067	1,061
Alternativa otimizada com laterais	4910	13	1,154	1,371

Tabela 30. Resultados para comparação com soluções alcançadas em (EMERICK 2009).

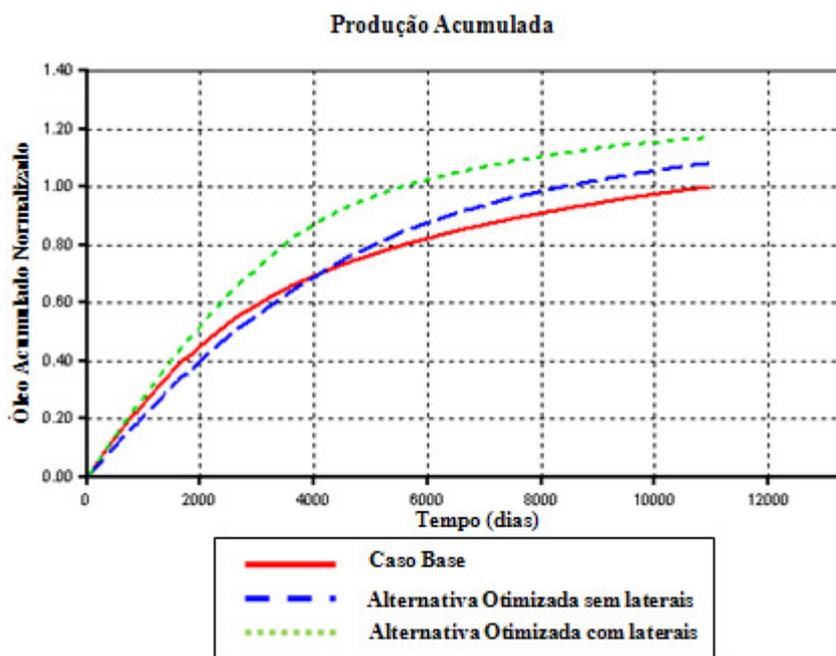
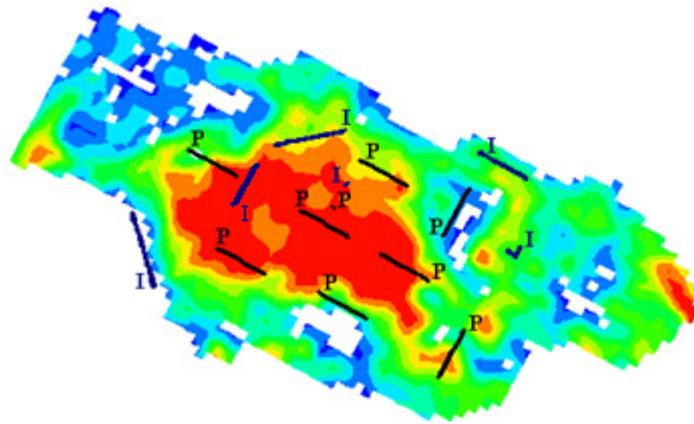
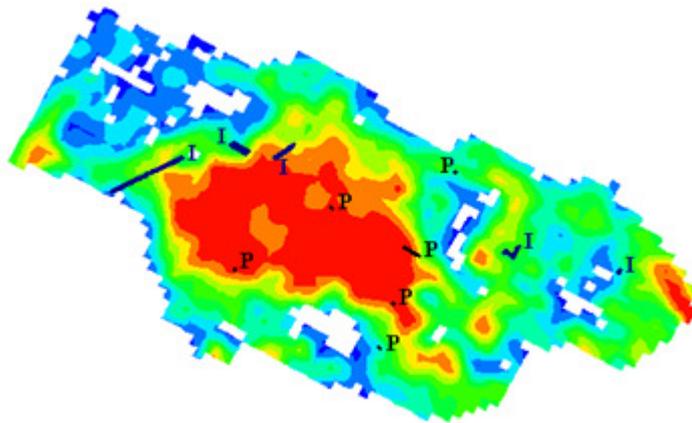


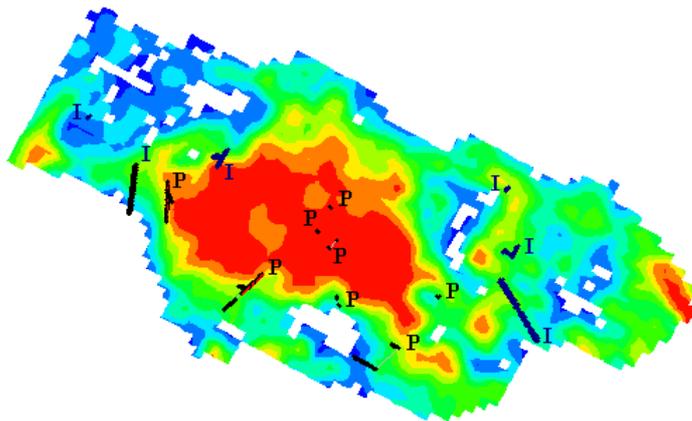
Figura 76. Resultados gráfico da produção de óleo do caso base e das alternativas otimizadas para comparação com (EMERICK 2009).



(a)



(b)



(c)

Figura 77. Projeção das alternativas no reservatório. Caso base (a), sem laterais (b), com laterais (c)

Analisando os resultados obtidos, pode-se observar um aumento na quantidade de óleo produzido e no VPL quando comparando as alternativas otimizadas ao caso base. Ao se comparar com as alternativas obtidas em

(EMERICK 2009) observa-se um aumento de 14% quando comparado a evolução sem semente inicial e de 7% quando comparado à alternativa otimizada a partir do caso base. No entanto, a alternativa otimizada sem laterais se mostrou inferior as alternativas otimizadas em (EMERICK 2009). Recalculando o VPL da alternativa gerada pela otimização da seção anterior, de comparação com o caso base, obtém-se um ganho de 17,7% sobre o caso base, o que indica que uma nova otimização poderia gerar valores mais próximos ou superior aos 19,9%, valor obtido pela otimização sem semente inicial sendo comparada.

Pode-se observar que ambas as alternativas otimizadas alcançaram maiores produções de óleo com um menor número de poços, isso caracteriza um posicionamento mais eficientes dos poços e uma economia que se reflete no VPL. No entanto, a produção da alternativa sem poços multilaterais ocorre mais lentamente que as demais, diminuindo, assim, seu VPL. Pode-se observar, ainda, que a alternativa otimizada com poços multilaterais antecipa parte de sua produção, o que leva a um aumento de VPL, quando comparada com as demais alternativas.

Novamente foi possível observar que as evoluções alcançam o VPL do caso base com significativa diferença de número de simulações, indicando que a busca com laterais se dá de modo mais rápido.

Analisando as imagens das alternativas otimizadas é possível observar que, com a mudança no cálculo do VPL, as alternativas otimizadas tendem a gerar poços verticais e o comprimento dos poços e laterais estão maiores que os resultados das otimizações anteriores. Pode-se perceber, também, que a modificação no cálculo do VPL fez com que o sistema tendesse a encontrar alternativas com maior óleo acumulado.