

5 Estudo de Casos

Para validar o modelo de otimização proposto neste trabalho, foram utilizados três modelos de reservatório distintos. O primeiro modelo consiste em um modelo de reservatório sintético homogêneo, o segundo em um modelo de reservatório sintético heterogêneo e o terceiro em um modelo de reservatório real. Os testes realizados com estes modelos de reservatório foram realizados variando os parâmetros evolutivos e analisando o desempenho do modelo em diferentes cenários econômicos.

5.1. Reservatório Homogêneo

O modelo homogêneo consiste em um modelo de reservatório com uma malha do tipo retangular de 30x30x1 blocos, nas direções i , j e k . As dimensões de cada bloco são 100x100x90 metros, a permeabilidade é igual a 1000 mD em todas as direções e a porosidade é igual a 0,2. Estes valores são os mesmos ao longo da reserva e a saturação inicial de água é 0,2 para todos os blocos, fazendo com que o potencial de óleo seja igual em todos os blocos, o que caracteriza a homogeneidade do reservatório.

Os poços produtores são surgentes no início da produção e a injeção de água foi utilizada como método de recuperação secundária. A alternativa de poços desse reservatório, fornecida por um especialista, é composta de 9 poços direcionais, sendo seis poços produtores e três poços injetores, onde todos os poços possuem completação molhada. Na Figura 5.1 é apresentada uma visão em 3D do modelo do reservatório.

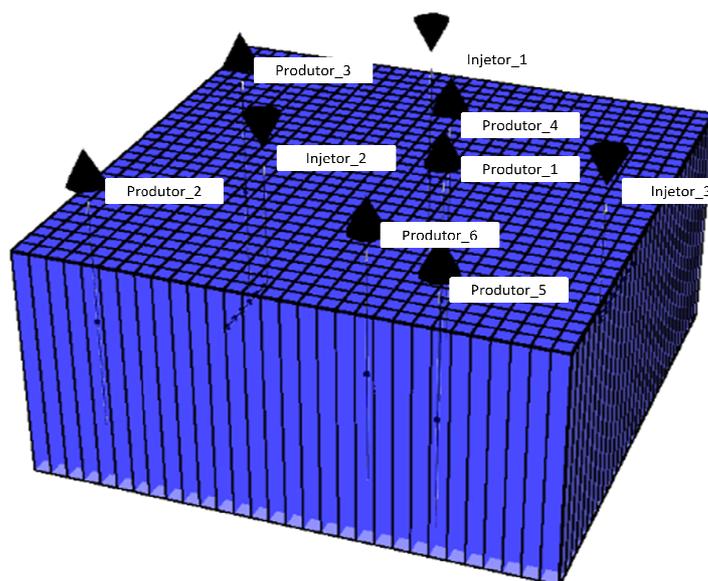


Figura 5.1: Modelo de reservatório homogêneo

Neste modelo de reservatório, a mínima pressão de fundo de poço dos poços produtores foi mantida em 50 Kg/cm² e a taxa máxima de produção de líquido foi mantida em 4200 m³/dia. Quanto aos poços injetores, a máxima pressão de fundo de poço foi mantida em 150 Kg/cm² e a taxa máxima de injeção de água foi mantida em 2000 m³/dia.

Foi considerado um intervalo mínimo de abertura entre os poços de 21 dias, com uma sonda de intervenção disponível desde o início da concessão do campo. A concessão do campo se inicia em janeiro de 2011 e termina em dezembro de 2035, totalizando 25 anos para o desenvolvimento dessa reserva. Para fins de comparação os resultados obtidos foram comparados ao Caso Base.

Caso Base

O Caso Base tem sua produção iniciada em janeiro de 2011 e apresenta um cronograma em que todos os poços são abertos simultaneamente, como mostra a Tabela 1. Apesar dessa abordagem ser considerada pelos especialistas uma situação hipotética, devido à dificuldade de se ter um alto número de sondas de intervenção disponíveis para tal serviço, ela é utilizada em alguns trabalhos, como [11] [12] [13].

Após simular o Caso Base foi possível obter seus dados de produção e injeção, descritos na Tabela 2, e assim foi possível calcular seu VPL, que foi de

US\$ 1.855.431.553,75. Para o cálculo do VPL foi mantido um valor fixo em US\$50,00 por barril de petróleo. Estes valores são utilizados na comparação com os resultados obtidos pelo modelo de solução proposto neste trabalho.

Tabela 1: Cronograma de abertura de poços do Caso Base

Cronograma de Abertura de Poços do Caso Base	
Poço	Data de abertura
Poço_Prod_1	01/01/2011
Poço_Prod_2	01/01/2011
Poço_Prod_3	01/01/2011
Poço_Prod_4	01/01/2011
Poço_Prod_5	01/01/2011
Poço_Prod_6	01/01/2011
Poço_Inj_1	01/01/2011
Poço_Inj_2	01/01/2011
Poço_Inj_3	01/01/2011

Tabela 2: Dados de produção do Caso Base

Dados de produção do Caso Base	
Produção acumulada de óleo (m ³)	37.086.000
Produção acumulada de gás (Mm ³)	747.430
Produção acumulada de água (m ³)	17.370.000
Injeção acumulada de água (m ³)	54.792.000

5.1.1. Teste 1

O Teste 1 busca encontrar o melhor cronograma de abertura de poços para este modelo de reservatório homogêneo, utilizando uma população de 50 indivíduos (possíveis soluções). A geração da população inicial foi feita aleatoriamente e a população evoluiu por 80 gerações consecutivas, sofrendo a ação dos operadores genéticos com taxas adaptativas ao longo da evolução.

No início da evolução foi utilizada uma taxa de cruzamento alta e uma taxa de mutação baixa a fim de tirar proveito das soluções disponíveis, próximo ao fim da evolução a taxa de cruzamento diminuiu e a de mutação aumentou para explorar mais o espaço de busca e evitar a convergência prematura. Foi utilizada

também uma taxa adaptativa de *steady state* entre as gerações permitindo no início da evolução, a preservação de um percentual maior dos melhores indivíduos, com a redução gradativa desse percentual ao longo da evolução. Os parâmetros evolutivos utilizados por este teste estão descritos na Tabela 3 e os parâmetros econômicos estão descritos na Tabela 4.

Tabela 3: Parâmetros evolutivos do Teste 1

Parâmetros evolutivos do Teste 1	
Tamanho da população	50
Número de gerações	80
Taxa de mutação inicial	0,08
Taxa de mutação final	0,30
Taxa de cruzamento inicial	0,65
Taxa de cruzamento final	0,08
Taxa de <i>steady state</i> inicial	0,40
Taxa de <i>steady state</i> final	0,20

Tabela 4: Parâmetros econômicos do Teste 1

Parâmetros econômicos	
Preço do óleo (US\$/m ³)	50
Preço do gás(US\$/1000m ³)	50
Custos de plataforma (MM US\$)	1.000
Custos de produção de óleo (US\$/m ³)	3
Custos de produção de gás (US\$/1000m ³)	1
Custos de produção de água (US\$/m ³)	3
Custos de injeção de água (US\$/m ³)	2
Alíquota de impostos	0,34
Taxa mínima de atratividade	0,10
Royalties	0,10

A curva de evolução do Teste 1 pode ser observada na Figura 5.2, que mostra a avaliação do melhor indivíduo a cada geração ao longo de todas as rodadas. O melhor indivíduo encontrado, cujo cronograma de abertura de poços está detalhado na Tabela 5, alcançou um VPL de US\$1.955.566.288,64. As produções e injeções acumuladas (Tabela 6) e o VPL do melhor indivíduo encontrado foram comparados ao Caso Base, como mostram os gráficos da Figura 5.3.

Utilizando o cronograma de abertura de poços proposto foi possível produzir 28.000 m³ de óleo a mais e reduzir a produção de água em 4%, acarretando em um aumento de 5,4% no VPL, como ilustra o gráfico da Figura 5.4.

Tabela 5: Cronograma de abertura dos poços do Teste 1

Cronograma de Abertura de Poços do Teste 1	
Poço	Data de abertura
Poço_Prod_1	21/01/2011
Poço_Inj_1	25/03/2011
Poço_Inj_3	06/05/2011
Poço_Inj_2	27/05/2011
Poço_Prod_3	19/08/2011
Poço_Prod_5	21/06/2013
Poço_Prod_6	30/10/2015
Poço_Prod_2	22/06/2018
Poço_Prod_4	30/10/2020

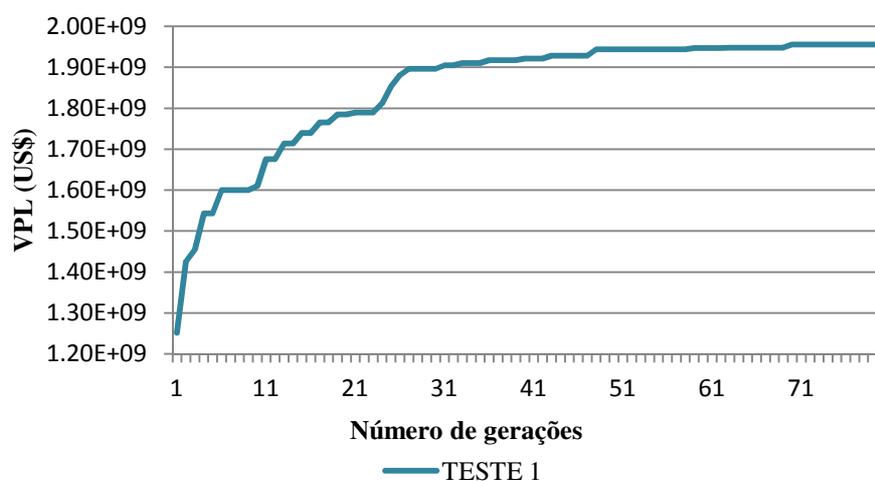


Figura 5.2: Evolução do Teste 1

Tabela 6: Dados de produção do Teste 1

Dados de produção do Teste 1	
Produção acumulada de óleo (m ³)	37.114.000
Produção acumulada de gás (m ³)	747.990.000
Produção acumulada de água (m ³)	16.666.000
Injeção acumulada de água (m ³)	54.072.000

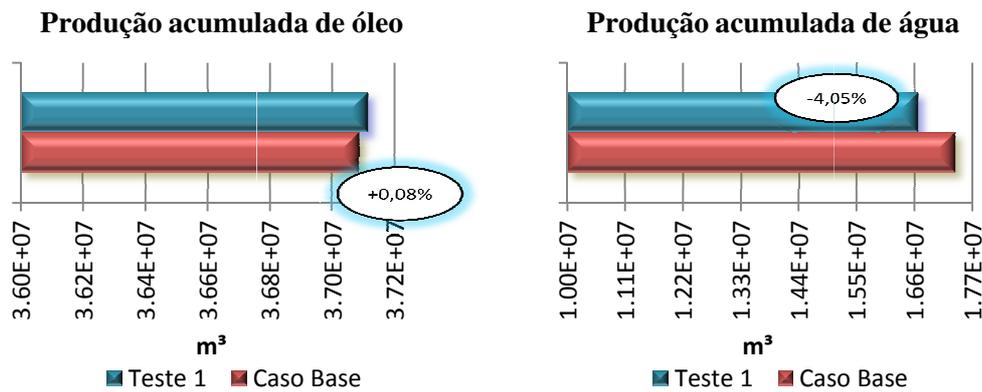


Figura 5.3: Comparação das produções acumuladas do Teste 1 e do Caso Base

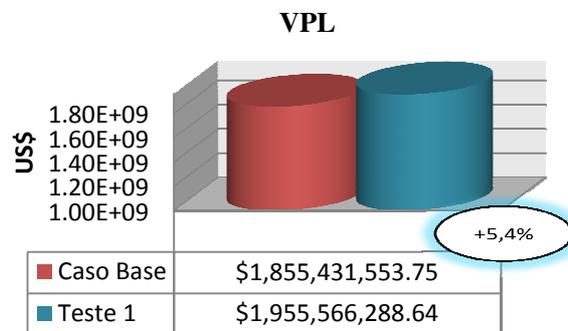


Figura 5.4: Comparação do VPL do Teste 1 e do Caso Base

O aumento da produção de óleo se deve pela conservação da pressão interna do reservatório por um período maior, devido ao intervalo entre as aberturas dos poços, dado pelo cronograma. Além disso, com a redução da produção de água foi possível reduzir os custos de produção e conseqüentemente aumentar o VPL.

5.1.2. Teste 2

A fim de melhorar a evolução do Teste 1, no Teste 2 optou-se por utilizar uma taxa de *steady state* entre rodadas, cujo parâmetro “*número de rodadas*” indica o número de vezes que o algoritmo genético é reiniciado com uma nova população inicial. Partida dessa nova população é formada pelos melhores indivíduos provenientes da rodada anterior, fazendo com que um percentual dos melhores indivíduos seja preservado, percentual este que é indicado pelo parâmetro “*taxa de steady state entre rodadas*”. Dessa forma, foi possível agregar maior diversidade à população ao longo da evolução.

Os parâmetros evolutivos utilizados estão descritos na Tabela 7 e os parâmetros econômicos foram os mesmos utilizados no Teste 1, descritos na Tabela 4.

Tabela 7: Parâmetros evolutivos do Teste 2

Parâmetros evolutivos do Teste 2	
Tamanho da população	50
Número de gerações	20
Número de rodadas	4
Taxa de mutação inicial	0,08
Taxa de mutação final	0,30
Taxa de cruzamento inicial	0,65
Taxa de cruzamento final	0,08
Taxa de <i>steady state</i> inicial	0,40
Taxa de <i>steady state</i> final	0,20
Taxa de <i>steady state</i> entre rodadas	0,10

A curva de evolução do Teste 2 (Figura 5.5) mostra resultados melhores comparados aos resultados obtidos através do Teste 1. O melhor indivíduo obtido, cujo cronograma está detalhado na Tabela 8, alcançou um VPL de US\$ 1.961.569.437,63.

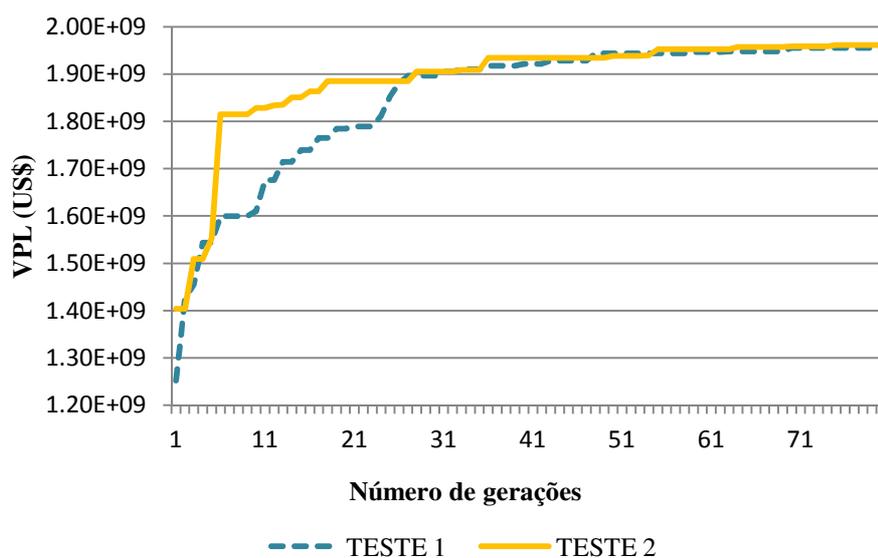


Figura 5.5: Evolução dos Testes 1 e 2

Tabela 8: Cronograma de abertura de poços do Teste 2

Cronograma de Abertura de Poços do Teste 2	
Poço	Data de abertura
Poço_Prod_1	21/01/2011
Poço_Inj_2	11/02/2011
Poço_Inj_3	06/05/2011
Poço_Prod_3	08/07/2011
Poço_Inj_1	29/07/2011
Poço_Prod_5	27/12/2013
Poço_Prod_4	27/05/2016
Poço_Prod_6	30/03/2018
Poço_Prod_2	18/10/2019

A comparação das produções acumuladas de óleo, gás e água injeção acumulada de água obtidos pelos melhores indivíduos encontrados no Teste 1 e no Teste 2 estão descritos na Tabela 9. De acordo com os resultados, é possível notar que a utilização do *steady state* entre rodadas permitiu encontrar indivíduos mais promissores. Assim, o melhor indivíduo do Teste 2 conseguiu maior produção de óleo, maior produção de gás e menor produção de água, tudo isso injetando menos água.

Tabela 9: Comparação da produção dos Testes 1 e 2

Dados de produção dos Testes 1 e 2		
	Teste 1	Teste 2
Produção acumulada de óleo (m ³)	37.114.000	37.299.000
Produção acumulada de gás (m ³)	747.990.000	751.730.000
Produção acumulada de água (m ³)	16.666.000	16.393.000
Injeção acumulada de água (m ³)	54.072.000	54.026.000

O resultado obtido pelo Teste 2 foi comparado ao Caso Base e pode-se notar nos gráficos da Figura 5.6 que a produção acumulada de óleo do Teste 2 foi superior ao Caso Base em 213.000m³ e a produção acumulada de água foi inferior em 977.000m³. Assim o melhor indivíduo do Teste 2 obteve um VPL 5.7% maior que o Caso Base, como pode ser observado no gráfico da Figura 5.7.

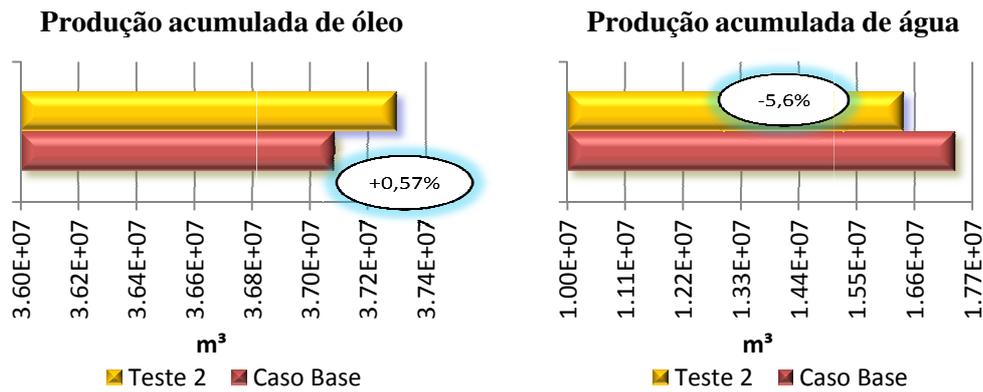


Figura 5.6: Comparação das produções acumuladas do Teste 2 e do Caso Base

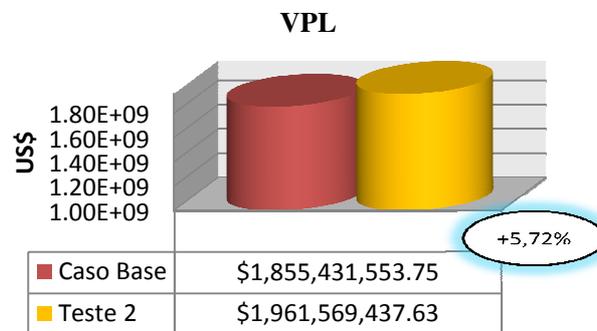


Figura 5.7: Comparação do VPL do Teste 2 e do Caso Base

5.1.3. Teste 3

O Teste 3 utiliza uma abordagem semelhante à do Teste 2. Todavia, a população inicial não é inteiramente gerada aleatoriamente, mas parte de uma semente inicial (cronograma do Case Base) para que a evolução inicie com uma alternativa potencialmente promissora.

Como a utilização do *steady state* entre rodadas, utilizada no Teste 2, se mostrou favorável à obtenção de resultados melhores, tal parâmetro foi mantido nesta abordagem. Os parâmetros evolutivos utilizados neste Teste 3 foram os mesmos utilizados no Teste 2, descritos na Tabela 7, e os parâmetros econômicos foram os mesmos utilizados nos Testes 1 e 2, descritos na Tabela 4.

A curva de evolução do Teste 3 mostra que a utilização de semente inicial permite ao modelo alcançar melhores resultados mais rapidamente. Isso pode ser observado, comparando as curvas de evolução dos Testes 2 e 3 (Figura 5.8), onde

ambos utilizam *steady state* entre rodadas, mas somente o Teste 3 parte de uma semente inicial. O cronograma de abertura de poços do melhor indivíduo do Teste 3 está detalhado na Tabela 10, e este indivíduo obteve um VPL de US\$2.011.630.392,49.

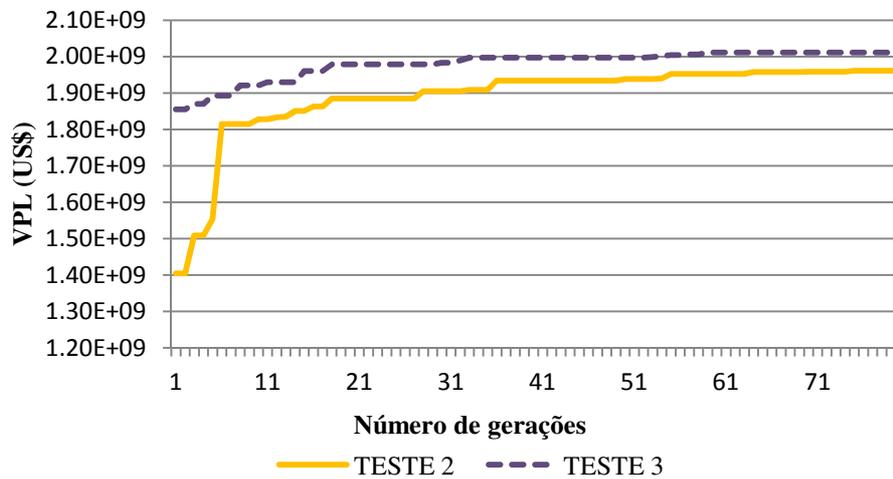


Figura 5.8: Evolução dos Testes 2 e 3

Tabela 10: Cronograma de abertura de poços do Teste 3

Cronograma de Abertura de Poços do Teste 3	
Poço	Data de abertura
Poço_Inj_1	21/01/2011
Poço_Prod_1	11/02/2011
Poço_Inj_2	04/03/2011
Poço_Prod_3	25/03/2011
Poço_Inj_3	15/04/2011
Poço_Prod_5	06/12/2013
Poço_Prod_4	09/09/2016
Poço_Prod_2	01/03/2019
Poço_Prod_6	28/05/2021

Os valores das produções acumuladas de óleo, gás e água e injeção acumulada de água obtidos pelo melhor indivíduo dos Testes 2 e 3 podem ser comparados na Tabela 11.

Tabela 11: Comparação da produção dos Testes 2 e 3

Dados de produção dos Testes 2 e 3		
	Teste 2	Teste 3
Produção acumulada de óleo (m ³)	37.299.000	37.386.000
Produção acumulada de gás (m ³)	751.730.000	753.490.000
Produção acumulada de água (m ³)	16.393.000	16.684.000
Injeção acumulada de água (m ³)	54.026.000	54.412.000

Comparando o resultado obtido pelo Teste 3 com o Caso Base pode-se notar nos gráficos da Figura 5.9 que a diferença de produção acumulada de óleo aumentou ainda mais, chegando a 300.000m³ e a produção acumulada de água teve 686.000m³ a menos. O cronograma de abertura de poços do melhor indivíduo do Teste 3 retardou ainda mais a abertura de alguns poços, elevando o VPL em 8,4%, como podeser observado no gráfico da Figura 5.10.

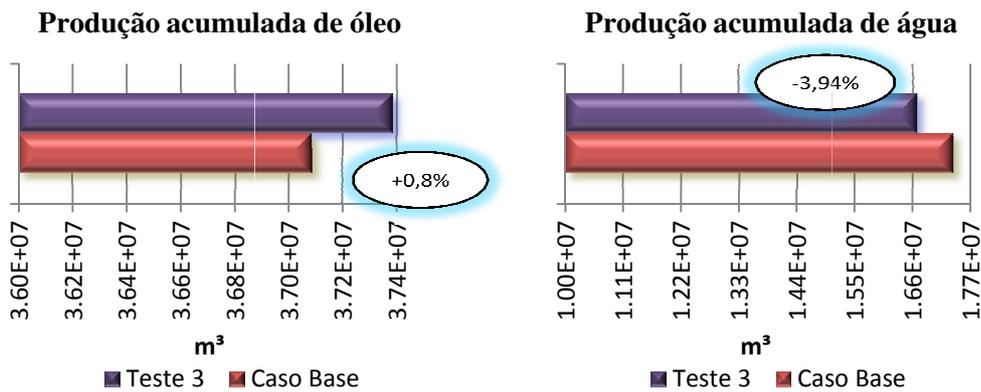


Figura 5.9: Comparação das produções acumuladas do Teste 3 e do Caso Base

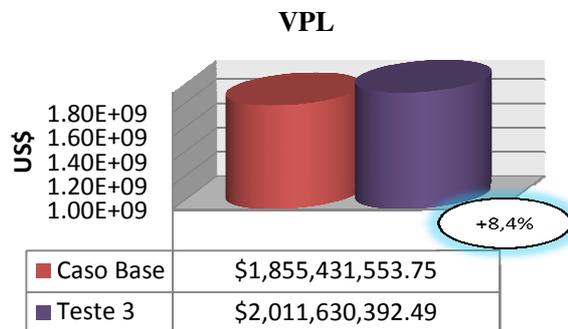


Figura 5.10: Comparação do VPL do Teste 3 e do Caso Base

5.1.4. Teste 4

O Teste 4, assim como o Teste3, também utiliza semente inicial e *steadystate* entre rodadas. Contudo, utiliza o dobro de indivíduos em sua população, passando a ter 100 possíveis soluções a cada geração. Os parâmetros evolutivos utilizados neste teste estão descritos na Tabela 12 e os parâmetros econômicos mais uma vez foram mantidos iguais aos testes anteriores, ou seja, estão descritos na Tabela 4.

Tabela 12: Parâmetros evolutivos do Teste 4

Parâmetros evolutivos do Teste 4	
Tamanho da população	100
Número de gerações	20
Número de rodadas	4
Taxa de mutação inicial	0,08
Taxa de mutação final	0,30
Taxa de cruzamento inicial	0,65
Taxa de cruzamento final	0,08
Taxa de <i>steadystate</i> inicial	0,40
Taxa de <i>steadystate</i> final	0,20
Taxa de <i>steadystate</i> entre rodadas	0,10

O aumento da população inicial possibilitou encontrar melhores indivíduos comparados aos obtidos pelo Teste3, como mostra o gráfico da Figura 5.11. O melhor indivíduo encontrado pelo Teste 3 alcançou um VPL de US\$2.039.137.646,34. O cronograma de abertura do melhor indivíduo encontrado está detalhado na Tabela 13 e os dados de produção dos Testes 3 e 4 podem ser comparados na Tabela 14.

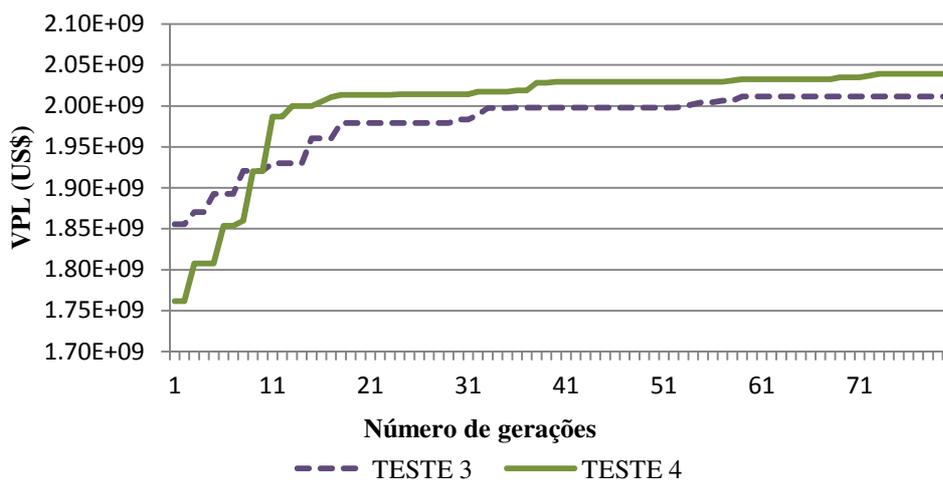


Figura 5.11: Evolução dos Testes 3 e 4

Tabela 13: Cronograma de abertura de poços do Teste 4

Cronograma de Abertura de Poços do Teste 4	
Poço	Data de abertura
Poço_Prod_1	21/01/2011
Poço_Inj_3	11/02/2011
Poço_Prod_3	04/03/2011
Poço_Inj_3	25/03/2011
Poço_Inj_1	15/04/2011
Poço_Prod_5	13/09/2013
Poço_Prod_4	22/01/2016
Poço_Prod_2	26/01/2018
Poço_Prod_6	06/05/2020

Tabela 14: Comparação da produção dos Testes 3 e 4

Dados de produção dos Testes 3 e 4		
	Teste 3	Teste 4
Produção acumulada de óleo (m³)	37.386.000	37.350.000
Produção acumulada de gás (m³)	753.490.000	752.750.000
Produção acumulada de água (m³)	16.684.000	16.621.000
Injeção acumulada de água (m³)	54.412.000	54.324.000

O melhor indivíduo obtido pelo Teste 4 foi comparado ao Caso Base e diante dos dados de produção foi possível aumentar a produção de óleo e reduzir a

produção de água, resultando em um VPL 9,9% mais alto, como pode ser constatado nos gráficos das Figuras 5.12 e 5.13.

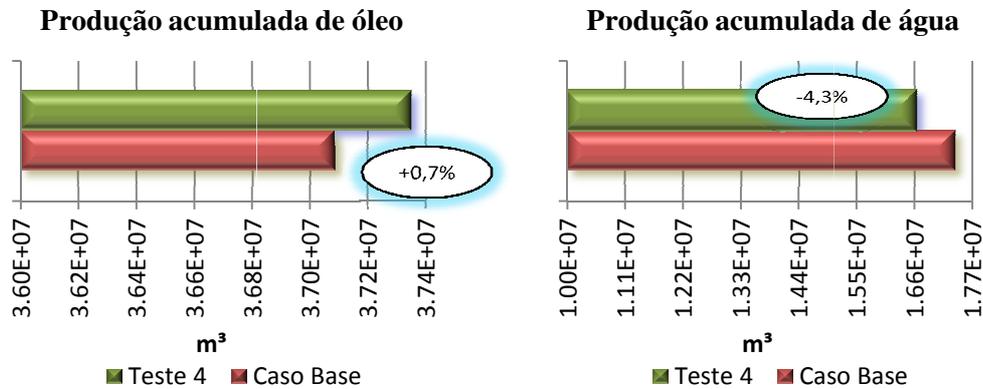


Figura 5.12: Comparação das produções acumuladas do Teste 4 e do Caso Base

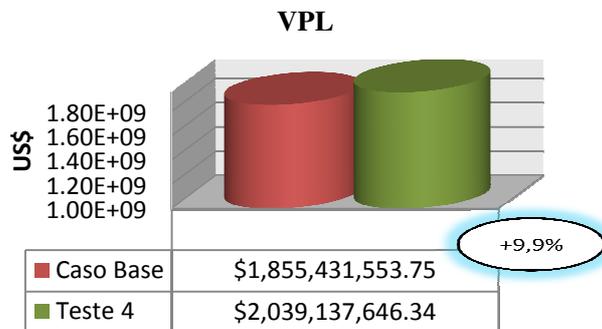


Figura 5.13: Comparação do VPL do Teste 4 e do Caso Base

5.2. Reservatório Heterogêneo

O reservatório heterogêneo consiste em um modelo de reservatório com uma malha de 33x57x3 blocos, nas direções i , j e k , cujas dimensões são de aproximadamente 100,0x100,0x8,66 metros. Os valores geológicos do reservatório são os seguintes:

- Permeabilidade: 575,0 mD nas direções i e j , e 57,40 mD na direção k ;
- Porosidade: 0,23;

A característica principal deste modelo é a existência de uma região com 100% de saturação de água na parte mais baixa, formando um aquífero. Este reservatório produz com mecanismo de produção de influxo de água, que permite um maior intervalo entre as aberturas dos poços produtores e injetores. As demais

regiões do reservatório possuem saturação de água no valor de 0,25. Este fato cria a condição de heterogeneidade da reserva.

No início da produção, os poços produtores são surgentes e, como método de recuperação secundária foi utilizada a injeção de água. A alternativa de poços utilizada nesse reservatório, fornecida por um especialista, é composta de 8 poços direcionais (Figura 5.14), sendo quatro poços produtores e quatro poços injetores, onde todos possuem completação molhada e estão sob uma lâmina d'água de 2.000 metros. Os custos de perfuração e completação de cada poço foram fornecidos previamente e estão entre US\$179.000.000 e US\$188.000.000.

A concessão deste campo se inicia em janeiro de 2011 e termina em dezembro de 2.035, totalizando 25 anos para o desenvolvimento dessa reserva.

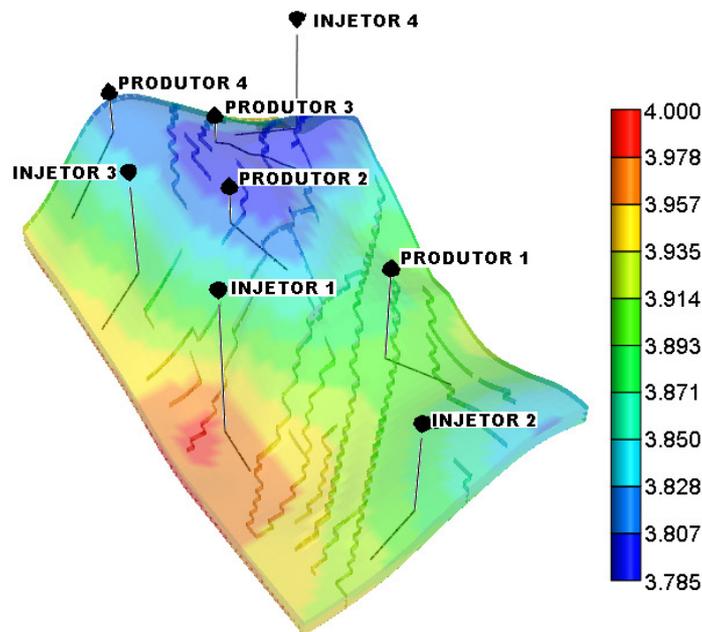


Figura 5.14: Modelo de reservatório heterogêneo

A taxa máxima de produção de líquido foi mantida em 2.500 m³/dia e a taxa máxima de injeção de água foi mantida em 2.500 m³/dia e o intervalo mínimo de abertura entre os poços é de 3 semanas. A sonda de intervenção está disponível desde o início da concessão do campo, que se inicia em janeiro de 2.011 e termina em dezembro de 2.035, totalizando 25 anos para o desenvolvimento dessa reserva. Para fins de comparação os resultados obtidos foram comparados ao Caso Base e o Caso do Especialista.

Caso Base

O Caso Base apresenta um cronograma em que todos os poços são abertos simultaneamente, como mostra a Tabela 15, e sua produção inicia em janeiro de 2011. Cronogramas desta natureza são utilizados em alguns trabalhos, como [11], [12] e [13].

Tabela 15: Cronograma de abertura de poços do Caso Base

Cronograma de Abertura de Poços do Caso Base	
Poço	Data de abertura
Poço_Prod_1	01/01/2011
Poço_Prod_2	01/01/2011
Poço_Prod_3	01/01/2011
Poço_Prod_4	01/01/2011
Poço_Inj_1	01/01/2011
Poço_Inj_2	01/01/2011
Poço_Inj_3	01/01/2011
Poço_Inj_4	01/01/2011

Após a simulação do Caso Base foi possível obter seus dados de produção, descritos na Tabela 16. A partir daí, foi possível calcular os valores de sua receita, de seus custos e do seu VPL, como mostra a Tabela 17. Para o cálculo do VPL foi mantido um preço fixo de US\$100,00 por barril de petróleo. Estes valores são utilizados na comparação dos resultados obtidos pelo modelo de solução proposto neste trabalho.

Tabela 16: Dados de produção do Caso Base

Dados de produção do Caso Base	
Produção acumulada de óleo (m ³)	21.684.657,36
Produção acumulada de gás (Mm ³)	254.743,75
Produção acumulada de água (m ³)	78.792.551,17
Injeção acumulada de água (m ³)	91.310.000,00

Tabela 17: Receita do Caso Base

Receita do Caso Base	
Custos de desenvolvimento (US\$)	1.503.147.441,21
Custos operacionais (US\$)	812.729.681,15

Valor Presente Líquido (US\$)	3.786.259.534,29
Receita total (US\$)	5.962.470.094,25

Caso do Especialista

O Caso do Especialista representa um cronograma manual para a alternativa de produção deste modelo, seguindo as restrições quanto ao tempo mínimo de abertura entre os poços para intervenção dos mesmos. Sua produção, assim como o Caso Base, se inicia em janeiro de 2011, e seu cronograma de abertura de poços é mostrado na Tabela 18.

Os dados de produção e injeção e os dados referentes à receita obtida a partir do cronograma de abertura de poços do especialista estão nas Tabelas 19 e 20, respectivamente. Para o cálculo do VPL do Caso do Especialista foi mantido um preço fixo de US\$100,00 por barril de petróleo.

Tabela 18: Cronograma de abertura de poços do Caso do Especialista

Cronograma de Abertura de Poços do Caso do Especialista	
Poço	Data de abertura
Poço_Prod_1	21/01/2011
Poço_Prod_2	11/02/2011
Poço_Prod_3	04/03/2011
Poço_Prod_4	25/03/2011
Poço_Inj_1	15/04/2011
Poço_Inj_2	06/05/2011
Poço_Inj_3	27/05/2011
Poço_Inj_4	17/06/2011

Tabela 19: Dados de produção do Caso do Especialista

Dados de produção do Caso do Especialista	
Produção acumulada de óleo (m ³)	21.686.186,87
Produção acumulada de gás (Mm ³)	254.269,69
Produção acumulada de água (m ³)	77.427.246,55
Injeção acumulada de água (m ³)	89.945.000,00

Tabela 20: Receita do Caso do Especialista

Receita do Caso do Especialista	
Custos de desenvolvimento (US\$)	1.432.022.869,15
Custos operacionais (US\$)	801.079.847,75
Valor Presente Líquido (US\$)	3.760.834.813,98
Receita total (US\$)	5.993.937.530,88

5.2.1. Teste 1

O Teste 1 foi realizado considerando um cenário econômico real, cujo preço do barril de petróleo foi estabelecido em US\$105,00 no primeiro ano de produção, supondo o início da produção no ano de 2.011, US\$ 95,00 após um ano, ou seja, em 2012, e US\$80,00 até o fim da produção em 2035. Os custos operacionais e de desenvolvimento foram mantidos, conforme Tabela 4.

Para a evolução do modelo, foram utilizados uma população inicial com 100 indivíduos gerados aleatoriamente, com *steady state* entre as gerações e as rodadas, e taxas adaptativas para os operadores genéticos. Estes parâmetros podem ser visualizados na Tabela 21.

A evolução do Teste 1 pode ser visualizada no gráfico da Figura 5.15 e o melhor indivíduo, cujo cronograma está descrito na Tabela 22, obteve um VPL de US\$3.244.406.746,01. As produções acumuladas pelo melhor indivíduo do Teste 1 podem ser visualizados pela Tabela 23.

Tabela 21: Parâmetros evolutivos do Teste 1

Parâmetros evolutivos do Teste 1	
Tamanho da população	100
Número de gerações	20
Número de rodadas	4
Taxa de mutação inicial	0,08
Taxa de mutação final	0,30
Taxa de cruzamento inicial	0,65
Taxa de cruzamento final	0,08
Taxa de <i>steady state</i> inicial	0,40
Taxa de <i>steady state</i> final	0,20
Taxa de <i>steady state</i> entre rodadas	0,10

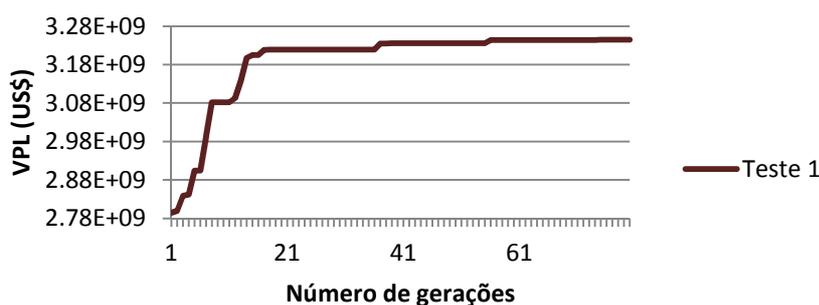


Figura 5.15: Evolução do Teste 1

Tabela 22: Cronograma de abertura de poços do Teste 1

Cronograma de Abertura de Poços do Teste 1	
Poço	Data de abertura
Poço_Prod_1	21/01/2011
Poço_Prod_3	11/02/2011
Poço_Prod_4	04/03/2011
Poço_Prod_2	25/03/2011
Poço_Inj_1	06/05/2011
Poço_Inj_4	27/05/2011
Poço_Inj_3	23/11/2012
Poço_Inj_2	17/01/2014

Tabela 23: Produção do Teste 1

Produção do Teste 1	
Produção acumulada de óleo (m³)	22.134.506,65
Produção acumulada de gás (Mm³)	259.990,30
Produção acumulada de água (m³)	73.124.179,08
Injeção acumulada de água (m³)	86.112.500,00

O Caso Base e o Caso do Especialista tiveram suas receitas e seus custos recalculados segundo o cenário econômico real que foi utilizado pelo Teste 1. Ao comparar o resultado obtido pelo Teste 1 com os Casos Base e do Especialista, notou-se que o VPL do Teste 1 foi superior em 1,78% comparado ao Caso Base e em 3,62% comparado ao Caso do Especialista, como mostra o gráfico da Figura 5.16. Esse aumento no VPL foi possível principalmente devido ao aumento da

produção de óleo e a redução da produção de água pelo melhor indivíduo do Teste 1, como mostram os gráficos da Figura 5.17.

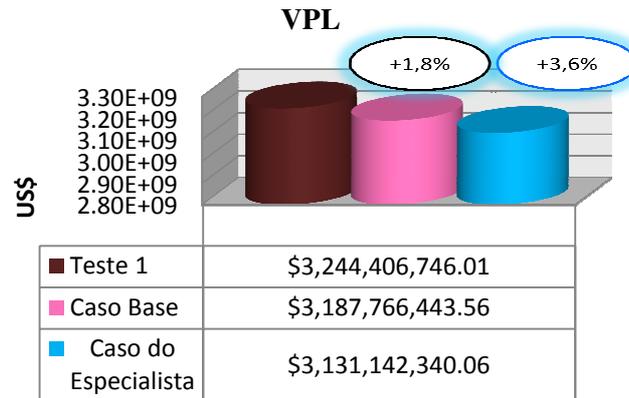


Figura 5.16: Comparação do VPL do Teste 5 com os Casos Base e do Especialista

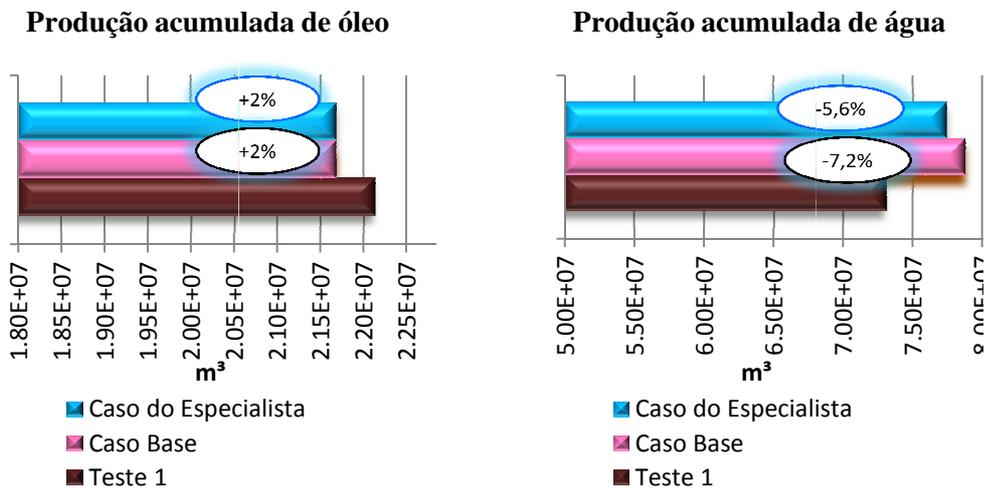


Figura 5.17: Comparação da produção acumulada do Teste 5 com os Casos Base e do Especialista

5.2.2. Teste 2

O Teste 2 foi realizado utilizando o mesmo cenário econômico do Teste 1, variando o preço do barril de petróleo nos três primeiros anos de produção, como foi explicado anteriormente. Todavia, a população inicial do Teste 2 não é gerada aleatoriamente. Nesse caso foi utilizado como semente inicial o cronograma de abertura de poços fornecido pelo especialista. Os demais parâmetros evolutivos permaneceram inalterados conforme a Tabela 21.

A evolução do Teste 2 foi comparada à evolução do Teste 1 e pode ser visualizada no gráfico da Figura 5.18. Nota-se que o melhor indivíduo encontrado por ambos os testes apresentam VPL's muito semelhantes. O melhor indivíduo do Teste 2, cujo cronograma esta descrito na Tabela 24, obteve um VPL de US\$3.244.451.389,31. As produções acumuladas pelo melhor indivíduo do Teste 1 e do Teste 2 estão descritas na Tabela 25 e a comparação dos seus respectivos VPL's pode ser visualizada pelo gráfico da Figura 5.19.

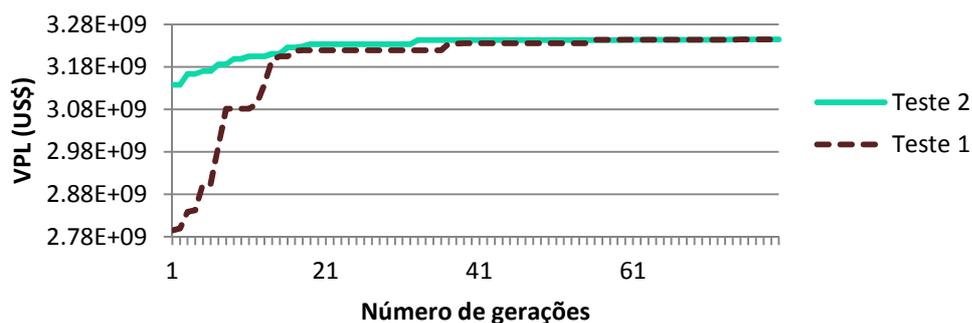


Figura 5.18: Evolução dos Testes 1 e 2

Tabela 24: Cronograma de abertura de poços do Teste 2

Cronograma de Abertura de Poços do Teste 2	
Poço	Data de abertura
Poço_Prod_1	21/01/2011
Poço_Prod_3	11/02/2011
Poço_Prod_2	04/03/2011
Poço_Prod_4	25/03/2011
Poço_Inj_1	15/04/2011
Poço_Inj_4	23/12/2011
Poço_Inj_3	23/11/2012
Poço_Inj_2	27/12/2013

Tabela 25: Comparação da produção acumulada dos Testes 1 e 2

Produção do Teste 1 e 2		
	Teste 1	Teste 2
Produção acumulada de óleo (m ³)	22.134.506,65	22.086.969,84
Produção acumulada de gás (Mm ³)	259.990,30	259.585,30
Produção acumulada de água (m ³)	73.124.179,08	72.747.211,21
Injeção acumulada de água (m ³)	86.112.500,00	85.692.500,00

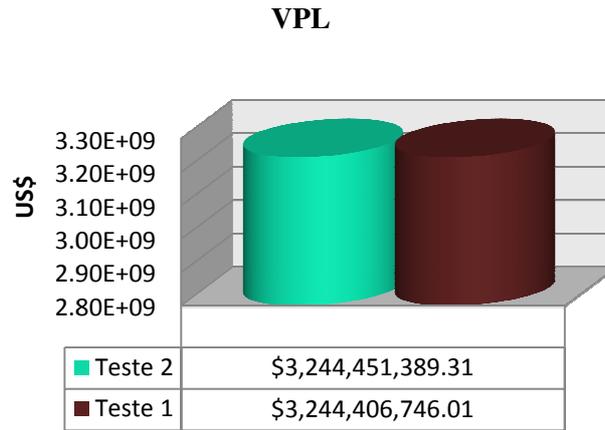
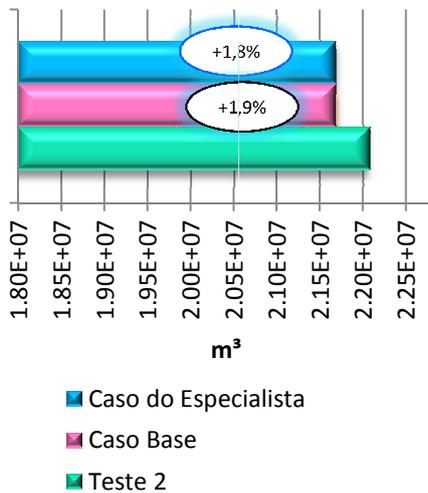


Figura 5.19: Comparação do VPL dos Testes 1 e 2

Diante dos resultados, pode-se dizer que a comparação dos VPL's do Teste 2 com o Caso Base e com o Caso do Especialista foram muito semelhantes às efetuadas entre estes casos e o Teste 1. Os gráficos das Figuras 5.20 e 5.21 ilustram isso. E pode-se observar um aumento na produção de óleo e uma redução na produção de água.

Produção acumulada de óleo



Produção acumulada de água



Figura 5.20: Comparação da produção acumulada do Teste 2 com os Casos Base e do Especialista

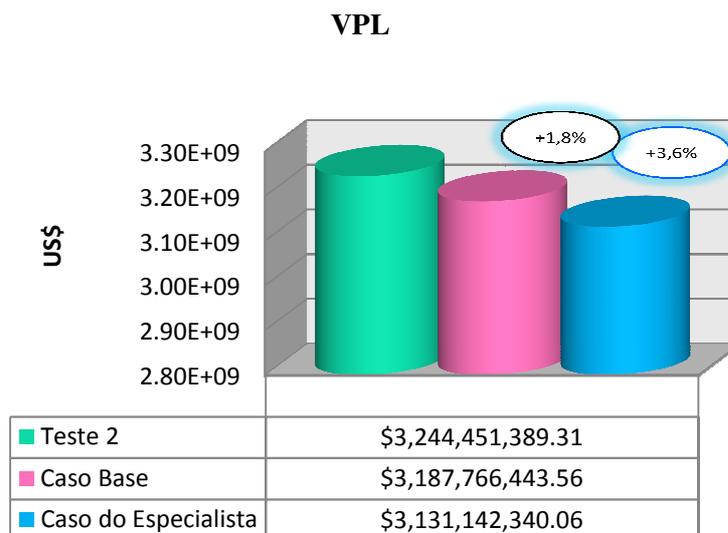


Figura 5.21: Comparação do VPL do Teste 6 com os Casos Base e do Especialista

5.2.3. Teste 3

No Teste 3 foi feito utilizando um cenário econômico otimista, cujo preço do barril de petróleo foi estabelecido em US\$105,00 no primeiro ano de produção, 2.012, e US\$100,00 até o fim da produção em 2.035. Os custos operacionais e de desenvolvimento se mantiveram com um acréscimo de 10% após o segundo ano de produção, haja vista o crescimento dos custos diante do aumento do preço do barril de petróleo.

Para a evolução do modelo utilizou-se uma população inicial com 100 indivíduos gerados aleatoriamente, com *steady state* entre as gerações e as rodadas, e taxas adaptativas para os operadores genéticos. Assim os parâmetros utilizados foram os mesmos utilizados nos últimos testes, visualizados na Tabela 21.

A evolução do Teste 3 pode ser visualizada no gráfico da Figura 5.22 e o melhor indivíduo encontrado, cujo cronograma de abertura de poços pode ser visualizado na Tabela 26, obteve um VPL de US\$3.890.198.306,10. As produções acumuladas e os valores referentes à receita do melhor indivíduo encontrado no Teste 3, podem ser visualizados nas Tabelas 27 e 28.

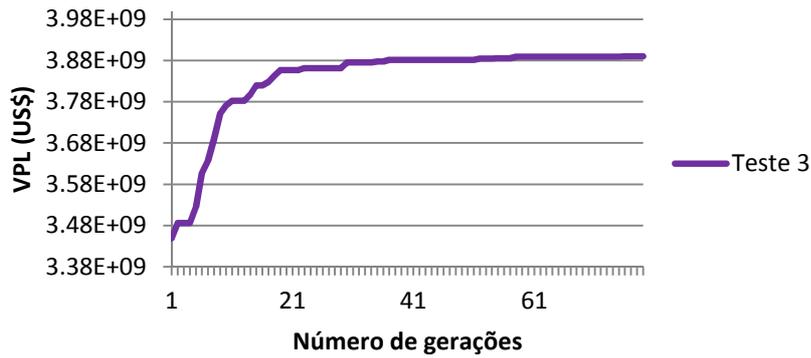


Figura 5.22: Evolução do Teste 3

Tabela 26: Cronograma de abertura de poços do Teste 3

Cronograma de Abertura de Poços do Teste 3	
Poço	Data de abertura
Poço_Prod_1	21/01/2011
Poço_Prod_3	11/02/2011
Poço_Prod_2	25/03/2011
Poço_Prod_4	15/04/2011
Poço_Inj_4	27/05/2011
Poço_Inj_1	17/06/2011
Poço_Inj_3	02/11/2012
Poço_Inj_2	15/11/2013

Tabela 27: Dados de produção do Teste 3

Dados de produção do Teste 3	
Produção acumulada de óleo (m³)	22.106.013,87
Produção acumulada de gás (Mm³)	259.512,20
Produção acumulada de água (m³)	73.251.618,10
Injeção acumulada de água (m³)	86.217.500,00

Tabela 28: Receita do Teste 3

Receita do Teste 3	
Custos de desenvolvimento (US\$)	1.368.724.716,00
Custos operacionais (US\$)	799.358.751,16
Valor Presente Líquido (US\$)	3.890.198.306,10

Receita total (US\$)	6.058.281.773,25
----------------------	------------------

Os Casos Base e do Especialista tiveram suas receitas e seus custos recalculados segundo o cenário econômico otimista. O melhor indivíduo obtido pelo Teste 3 obteve um VPL 3% maior que os VPL's dos Casos Base e do Especialista, como mostra o gráfico da Figura 5.23. O cronograma de abertura de poços proposto pelo melhor indivíduo do Teste 3 permitiu aumentar a produção de óleo e reduzir produção de água acumulada comparado aos Casos Base e do Especialista (Figura 5.24).

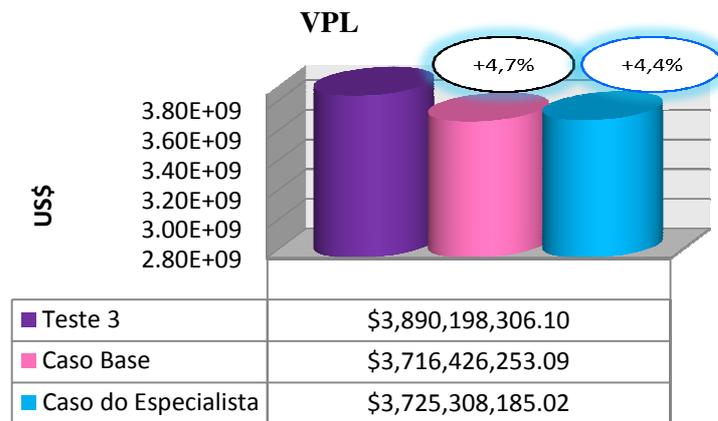


Figura 5.23: Comparação do VPL do Teste 3 com os Casos Base e do Especialista

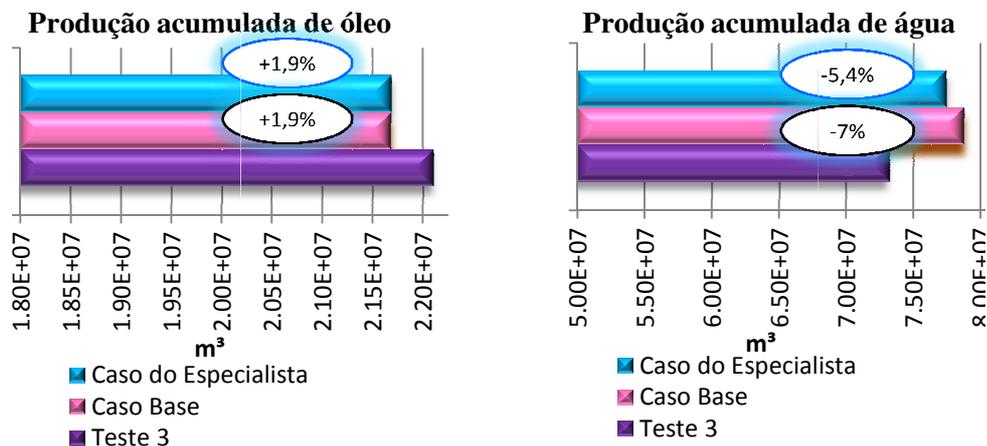


Figura 5.24: Comparação da produção acumulada do Teste 3 com os Casos Base e do Especialista

5.2.4. Teste 4

O Teste 4, assim como o Teste 3 utiliza um cenário econômico otimista. Porém, este teste difere do anterior devido ao fato de sua população inicial não ser gerada de forma totalmente aleatória. É utilizada como semente inicial o cronograma de abertura de poços fornecido pelo especialista. Os demais parâmetros evolutivos permaneceram inalterados, conforme a Tabela 21.

Notou-se que a utilização da semente inicial conduziu o processo de otimização a um resultado melhor comparado ao Teste 3. A evolução de ambos os testes pode ser visualizada no gráfico da Figura 5.25. O melhor indivíduo do Teste 4, cujo cronograma pode ser visualizado na Tabela 29, obteve um VPL de US\$3.904.435.829,81. A comparação das produções acumuladas e da receita, dos melhores indivíduos dos Testes 3 e 4, pode ser vista nas Tabelas 30 e 31, respectivamente.

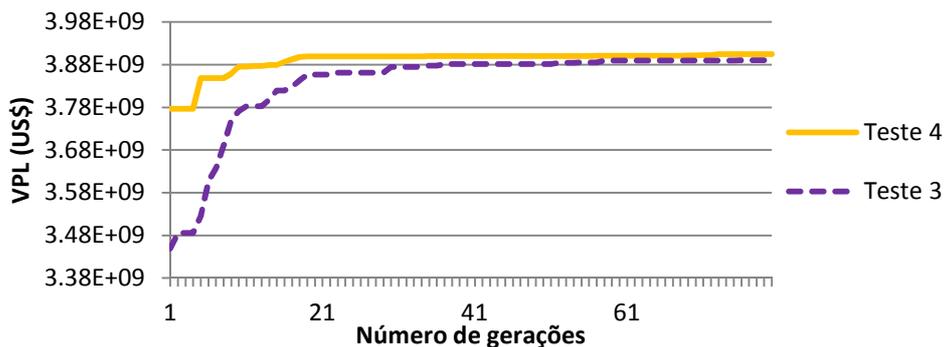


Figura 5.25: Evolução dos Testes 3 e 4

Tabela 29: Cronograma de abertura de poços do Teste 4

Cronograma de Abertura de Poços do Teste 4	
Poço	Data de abertura
Poço_Prod_1	21/01/2011
Poço_Prod_3	11/02/2011
Poço_Prod_2	04/03/2011
Poço_Prod_4	25/03/2011
Poço_Inj_4	15/04/2011
Poço_Inj_1	06/05/2011
Poço_Inj_3	30/06/2012
Poço_Inj_2	14/09/2013

Tabela 30: Comparação da produção dos Testes 3 e 4

Dados de produção dos Testes 3 e 4		
	Teste 3	Teste 4
Produção acumulada de óleo (m³)	22.106.013,87	22.113.614,55
Produção acumulada de gás (Mm³)	259.512,20	259.537,19
Produção acumulada de água (m³)	73.251.618,10	73.934.330,91
Injeção acumulada de água (m³)	86.217.500,00	86.900.000,00

Tabela 31: Comparação das receitas dos Testes 3 e 4

Receita dos Testes 3 e 4		
	Teste 3	Teste 4
Custos de desenvolvimento (US\$)	1.368.724.716,00	1.381.918.581,01
Custos operacionais (US\$)	799.358.751,16	805.256.474,52
Valor Presente Líquido (US\$)	3.890.198.306,10	3.904.435.829,81
Receita total (US\$)	6.058.281.773,25	6.091.610.885,35

O melhor indivíduo obtido no Teste 4 foi comparado ao Caso Base e ao Caso do Especialista, e os gráficos das Figuras 5.26 e 5.27 mostram suas respectivas produções acumuladas de água e de óleo e o VPL. Observou-se uma redução na produção de água e um aumento na produção de óleo e no VPL.

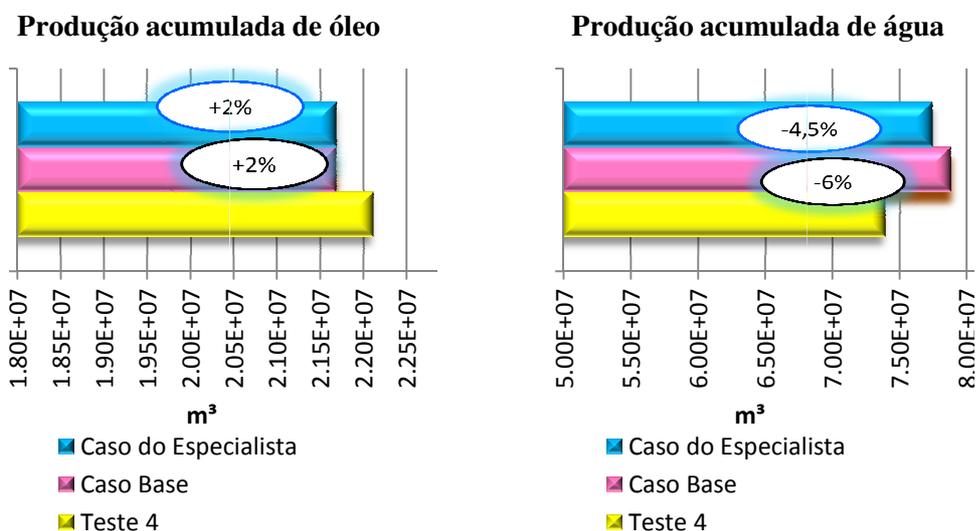


Figura 5.26: Comparação da produção acumulada do Teste 4 com os Casos Base e do Especialista

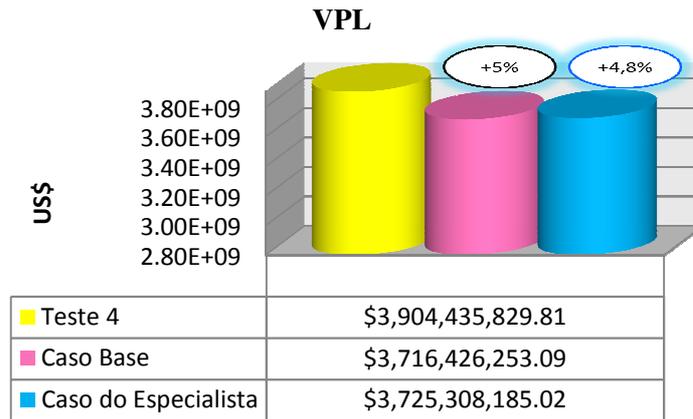


Figura 5.27: Comparação do VPL dos Testes 4 com os Casos Base e do Especialista

5.2.5. Teste 5

O Teste 5 foi realizado considerando um cenário econômico desfavorável, cujo preço do barril de petróleo foi estabelecido em US\$45,00 do início ao fim da produção, considerando uma produção de 25 anos. Para a evolução do modelo utilizou-se uma população inicial com 100 indivíduos gerados aleatoriamente, com *steady state* entre as gerações e as rodadas. Foram utilizadas, também, taxas adaptativas para os operadores genéticos. Os parâmetros utilizados podem ser visualizados na Tabela 21.

A evolução do Teste 5 pode ser visualizada no gráfico da Figura 5.28. O melhor indivíduo, cujo cronograma pode ser visualizado pela Tabela 32, obteve um VPL de US\$938.436.421,57. As produções acumuladas e os valores dos custos podem ser visualizados nas Tabelas 33 e 34.

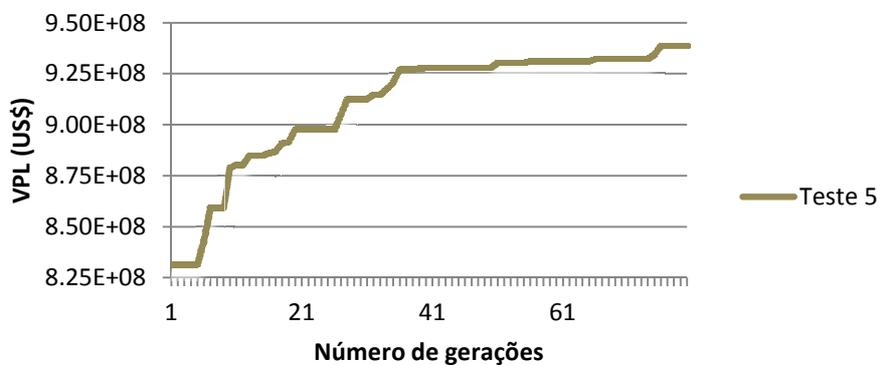


Figura 5.28: Evolução do Teste 5

Tabela 32: Cronograma de abertura de poços do Teste 5

Cronograma de Abertura de Poços do Teste 5	
Poço	Data de abertura
Poço_Prod_1	21/01/2011
Poço_Prod_3	11/02/2011
Poço_Prod_4	15/04/2011
Poço_Prod_2	02/12/2011
Poço_Inj_4	02/08/2013
Poço_Inj_2	09/01/2015
Poço_Inj_3	17/06/2016
Poço_Inj_1	15/12/2017

Tabela 33: Dados de produção do Teste 5

Dados de produção do Teste 5	
Produção acumulada de óleo (m ³)	21.554.113,15
Produção acumulada de gás (Mm ³)	249.074,13
Produção acumulada de água (m ³)	61.473.102,42
Injeção acumulada de água (m ³)	73.932.500,00

Tabela 34: Receita do Teste 5

Receita do Teste 5	
Custos de desenvolvimento (US\$)	1.183.995.566,46
Custos operacionais (US\$)	371.634.133,73
Valor Presente Líquido (US\$)	938.436.421,57
Receita total (US\$)	2.494.066.121,76

Comparando o resultado obtido pelo Teste 5 com os Casos Base e do Especialista com suas respectivas receitas e seus custos recalculados segundo o cenário econômico desfavorável, observa-se um aumento no VPL de 17,2% comparado ao Caso Base e de 15,6% comparado ao Caso do Especialista, como mostra o gráfico da Figura 5.29. A comparação das respectivas produções acumuladas de óleo e água podem ser observadas nos gráficos da Figura 5.30, onde o melhor indivíduo do Teste 5 alcançou VPL e produção de óleo superiores e produção de água inferior.

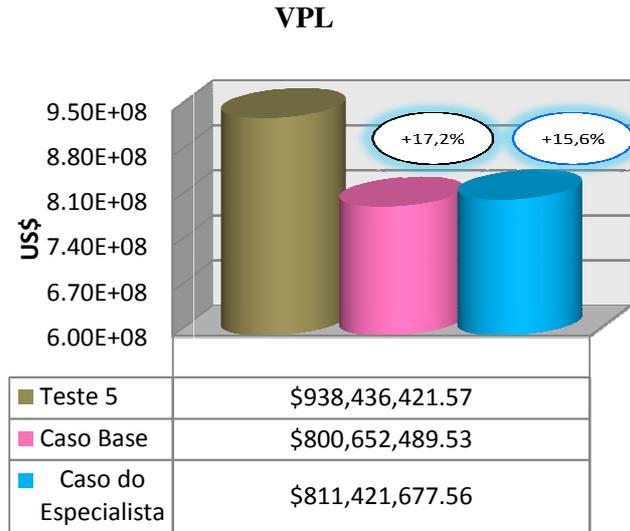


Figura 5.29: Comparação do VPL do Teste 5 com os Casos Base e do Especialista

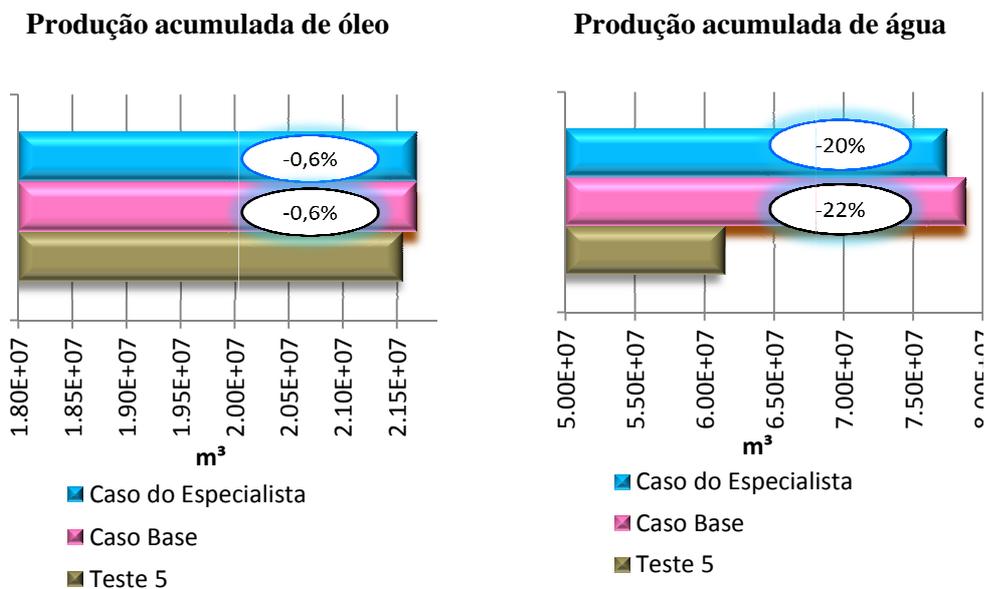


Figura 5.30: Comparação da produção acumulada do Teste 5 com os Casos Base e do Especialista

5.2.6. Teste 6

Assim como o Teste 5, o Teste 6 utiliza um cenário econômico desfavorável, com o preço do óleo sendo mantido em US\$45,00, mas a população inicial utiliza como semente inicial o cronograma de abertura de poços fornecido

pelo especialista. Os demais parâmetros evolutivos permaneceram inalterados, segundo a Tabela 21.

Notou-se que o Teste 6 encontrou um resultado melhor comparado ao Teste 5 e a evolução de ambos os testes pode ser visualizada na Figura 5.31. O melhor indivíduo do Teste 6, cujo cronograma está descrito na Tabela 35, obteve um VPL de US\$951.342.887,34 e suas produções acumuladas e os valores dos custos podem ser visualizados nas Tabelas 36 e 37. A comparação do VPL entre os melhores indivíduos dos Testes 5 e 6 pode ser observada no gráfico da Figura 5.32.

O melhor indivíduo obtido pelo Teste 6 foi comparado aos Casos Base e do Especialista, e os gráficos da Figura 5.33 mostram suas respectivas produções acumuladas de água e de óleo. O gráfico da Figura 5.34 mostra os VPL's obtidos pelo Teste 6, pelo Caso Base e pelo Caso do Especialista. Neste teste foi possível obter um aumento de 17,2% no VPL comparado ao Caso Base e de 18,8% comparado ao Caso do Especialista.

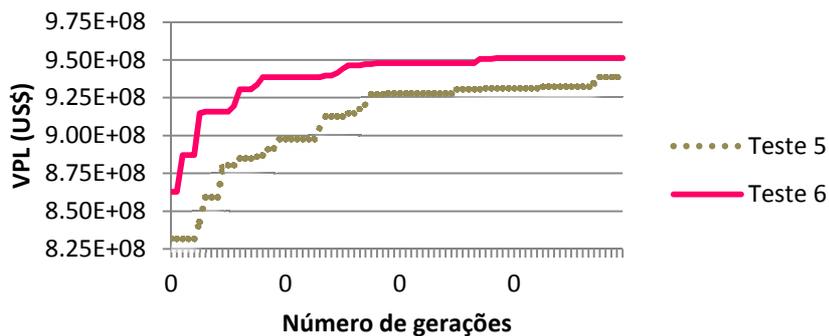


Figura 5.31: Evolução dos Teste 5 e 6

Tabela 35: Cronograma de abertura de poços do Teste 6

Cronograma de Abertura de Poços do Teste 6	
Poço	Data de abertura
Poço_Prod_1	21/01/2011
Poço_Prod_3	11/02/2011
Poço_Prod_4	15/04/2011
Poço_Prod_2	02/12/2011
Poço_Inj_4	02/08/2013
Poço_Inj_2	09/01/2015
Poço_Inj_3	17/06/2016
Poço_Inj_1	15/12/2017

Tabela 36: Comparação da produção dos Testes 5 e 6

Dados de produção dos Testes 5 e 6		
	Teste 5	Teste 6
Produção acumulada de óleo (m³)	21.554.113,15	21.572.287,66
Produção acumulada de gás (Mm³)	249.074,13	249.397,70
Produção acumulada de água (m³)	61.473.102,42	63.331.579,43
Injeção acumulada de água (m³)	73.932.500,00	75.770.000,00

Tabela 37: Comparação das receitas dos Testes 5 e 6

Receita dos Testes 5 e 6		
	Teste 5	Teste 6
Custos de desenvolvimento (US\$)	1.183.995.566,46	1.221.743.611,74
Custos operacionais (US\$)	371.634.133,73	383.549.939,00
Valor Presente Líquido (US\$)	938.436.421,57	951.342.887,34
Receita total (US\$)	2.494.066.121,76	2.556.636.438,08

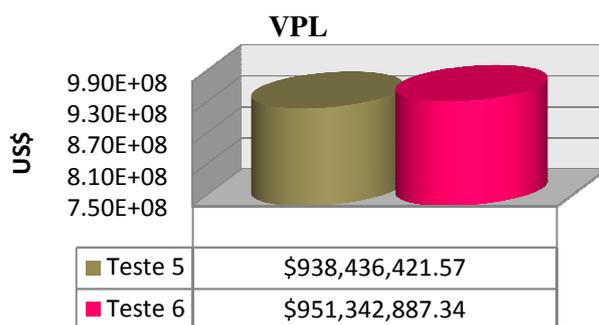
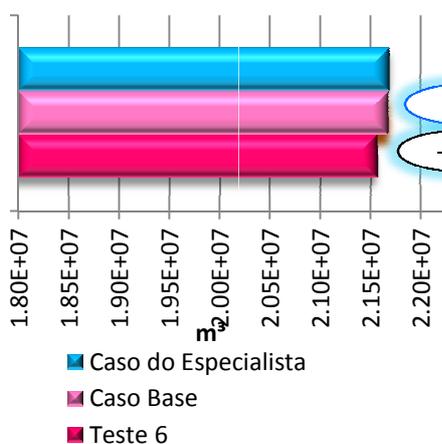


Figura 5.32: Comparação do VPL dos Testes 5 e 6

Produção acumulada de óleo



Produção acumulada de água

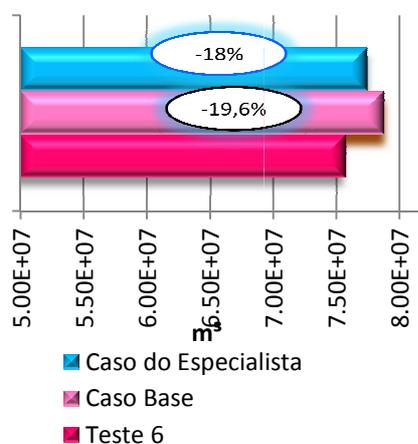


Figura 5.33: Comparação da produção acumulada do Teste 6 com os Casos Base e do Especialista

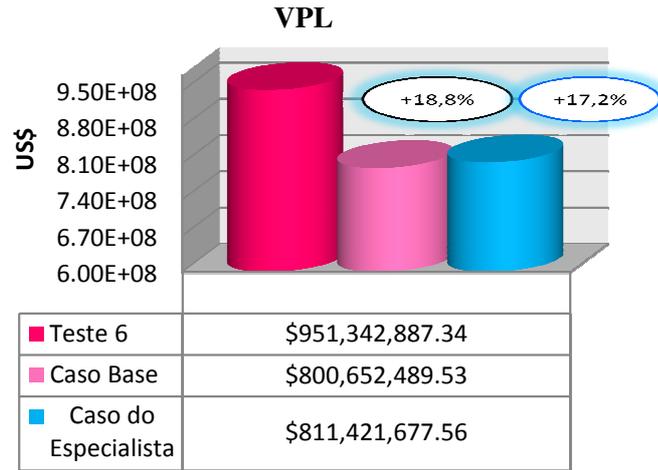


Figura 5.34: Comparação do VPL do Teste 6 com os Casos Base e do Especialista

5.3. Reservatório Real

O reservatório real consiste em um modelo baseado no Campo de Namorado (Figura 5.35). Trata-se de um reservatório de arenito consolidado, representado por uma malha do tipo corner point, com 83x45x23 blocos nas direções i, j, k. A permeabilidade e a porosidade do reservatório são heterogêneas em toda a sua extensão e a saturação de água gira em torno de 0,25 em todo o reservatório.

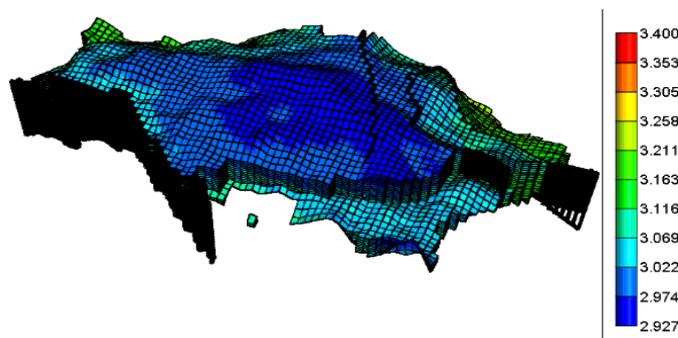


Figura 5.35: Modelo de reservatório real

A configuração de poços deste modelo é composta por 14 poços surgentes, sendo 8 produtores e 6 injetores de água. Os custos de perfuração e completção de cada poço foram estimados entre US\$127 MM e US\$160 MM. A concessão do campo tem início em janeiro de 2011 e totaliza 25 anos para o desenvolvimento.

Os poços operam em condições limitadas, onde a taxa máxima de produção de líquido é de 2000 m³/dia e a taxa máxima de injeção de água é de 2666 m³/dia. O intervalo mínimo de abertura entre os poços foi considerado de 3 semanas e há uma sonda de intervenção disponível a partir do primeiro dia de exploração do campo.

Este modelo de reservatório foi utilizado a fim de avaliar o desempenho do modelo de solução proposto frente a modelos de reservatórios reais. Os resultados obtidos foram comparados aos casos ideal e do especialista. Assim como no modelo anterior, o caso ideal considera que todos os poços são abertos simultaneamente e o caso do especialista, como o próprio nome sugere, considera um cronograma manual proposto por um especialista.

O preço do barril de petróleo foi estabelecido em U\$\$100,00 do início ao fim da produção. Os demais parâmetros econômicos e os parâmetros evolutivos foram os mesmos utilizados para o modelo de reservatório heterogêneo, descritos nas Tabelas 4 e 21, respectivamente.

Na Tabela 38 é apresentada a comparação do cronograma otimizado com os cronogramas dos casos ideal e do especialista. Nota-se que o modelo propôs um cronograma cuja ordem de abertura dos poços é idêntica à ordem proposta pelo especialista. Contudo, o intervalo de abertura entre o antepenúltimo poço e seu sucessor é alterado significativamente. Tal alteração mostra que a abertura dos últimos poços injetores pode ser retardada, resultando na redução da produção de água.

Tabela 38: Cronograma de abertura do modelo de reservatório real

Caso otimizado		Caso ideal		Caso do especialista	
Poço	Data de abertura	Poço	Data de abertura	Poço	Data de abertura
Poço_Prod_2	21/01/2011	Poço_Prod_1	01/01/2011	Poço_Prod_2	21/01/2011
Poço_Prod_4	11/02/2011	Poço_Prod_2	01/01/2011	Poço_Prod_4	11/02/2011
Poço_Prod_5	04/03/2011	Poço_Prod_3	01/01/2011	Poço_Prod_5	04/03/2011
Poço_Prod_1	25/03/2011	Poço_Prod_4	01/01/2011	Poço_Prod_1	25/03/2011
Poço_Prod_3	15/04/2011	Poço_Prod_5	01/01/2011	Poço_Prod_3	15/04/2011
Poço_Prod_6	06/05/2011	Poço_Prod_6	01/01/2011	Poço_Prod_6	06/05/2011
Poço_Prod_7	27/05/2011	Poço_Prod_7	01/01/2011	Poço_Prod_7	27/05/2011
Poço_Prod_8	17/06/2011	Poço_Prod_8	01/01/2011	Poço_Prod_8	17/06/2011
Poço_Inj_1	08/07/2011	Poço_Inj_1	01/01/2011	Poço_Inj_1	08/07/2011
Poço_Inj_2	29/07/2011	Poço_Inj_2	01/01/2011	Poço_Inj_2	29/07/2011
Poço_Inj_3	19/08/2011	Poço_Inj_3	01/01/2011	Poço_Inj_3	19/08/2011
Poço_Inj_4	09/09/2011	Poço_Inj_4	01/01/2011	Poço_Inj_4	09/09/2011
Poço_Inj_5	11/02/2012	Poço_Inj_5	01/01/2011	Poço_Inj_5	30/09/2011
Poço_Inj_6	03/03/2012	Poço_Inj_6	01/01/2011	Poço_Inj_6	21/10/2011

Na Tabela 39 é apresentada a comparação dos dados de produção do caso otimizado com os casos ideal e do especialista. O caso otimizado superou a produção acumulada de óleo em 5,4%, comparada ao caso ideal, e em 7,5%, comparada ao caso do especialista. Já a produção acumulada de água foi reduzida em 5,7% e 0,3% comparadas aos casos ideal e do especialista, respectivamente. Além disso, também foi possível reduzir a injeção acumulada de água em 5,2%, comparada ao caso ideal, e 2,6% comparada ao caso do especialista. Assim, o VPL obtido pelo caso otimizado foi 0,9% maior que o VPL do caso ideal e 2,9% maior que o VPL do caso do especialista.

Tabela 39: Dados de produção do modelo de reservatório real

	Caso otimizado	Caso ideal	Caso do especialista
Produção acumulada de óleo (m ³)	51.912.000,00	49.256.000,00 (5,4% de aumento)	48.276.010,00 (7,5% de aumento)
Produção acumulada de gás (m ³)	11.490.000,00	11.227.000,00 (2,3% de aumento)	11.643.000,00 (1,3% de redução)
Produção acumulada de água (m ³)	79.567.000,00	84.380.000,00 (5,7% de redução)	79.837.000,00 (0,3% de redução)
Injeção acumulada de água (m ³)	138.531.000,00	146.059.000,00 (5,2% de redução)	142.196.000,00 (2,6% de redução)
VPL (US\$)	9.561.443.512,50	9.474.248.999,40 (0,9% de aumento)	9.291.721.708,69 (2,9% de aumento)