

## 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, denominado neste estudo de Campo-1 e teve como principal objetivo validar algumas restrições. O Campo-2 trata de um modelo também sintético, porém heterogêneo, e seu único objetivo foi validar a restrição de ângulo máximo de curvatura dos poços. O terceiro modelo é baseado em um reservatório real, denominado Campo-3, que foi utilizado para a realização de alguns testes e análises estatísticas.

#### 5.1

##### Modelo de Reservatório Sintético Homogêneo

O Campo-1 possui forma paralelepípeda com dimensões 30x30x1. O campo é descrito em forma de um grid e possui 30 células na direção  $i$ , 30 na direção  $j$  e apenas 1 camada na direção  $k$  (profundidade). Além disso, todas as células possuem o mesmo tamanho (100,0x100,0x90,0 metros) e são consideradas ativas, ou seja, em todas elas podemos ter a colocação de poços verticais e ou direcionais, produtores e ou injetores. O valor de permeabilidade é igual a 1000,0 md em todas as direções e porosidade igual a 0,2.

Estes valores são os mesmos ao longo da reserva e a saturação de água inicial 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. As Figuras Figura 5.1 e Figura 5.2 ilustram o Campo-1 com vistas em duas dimensões e três dimensões, respectivamente.

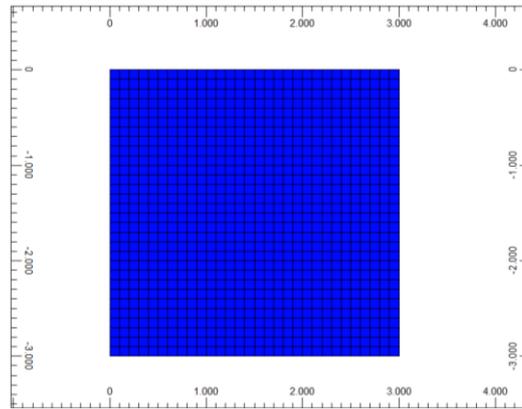


Figura 5.1: Campo-1 visto em 2D

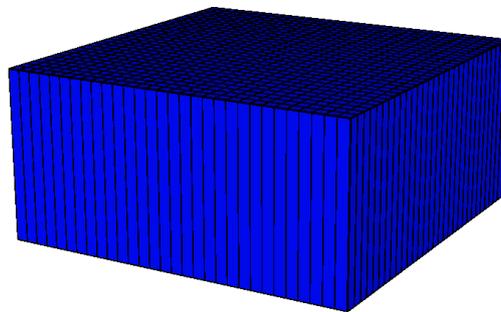


Figura 5.2: Campo-1 visto em 3D

Cada um dos testes realizados nesse campo possui no início da produção poços produtores surgentes e como método de recuperação secundária, foi utilizada injeção de água. A concessão do campo se inicia em janeiro de 2001 e termina em dezembro de 2022, totalizando 22 anos para o desenvolvimento dessa reserva.

Algumas restrições foram consideradas em relação ao reservatório, como a pressão de fundo de poço (BHP), taxa máxima de produção de líquido (STL) e taxa máxima de injeção de água (STW). Os valores utilizados podem ser vistos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Restrições do Campo-1

| Restrições do Campo 1   |     |                           |
|-------------------------|-----|---------------------------|
| <b>Poços Produtores</b> |     |                           |
| STL                     | Máx | 4.200 m <sup>3</sup> /dia |
| BHP                     | Min | 50 kg/cm <sup>2</sup>     |
| <b>Poços Injetores</b>  |     |                           |
| STW                     | Máx | 2.000 m <sup>3</sup> /dia |
| BHP                     | Máx | 105 kg/cm <sup>2</sup>    |

Os testes realizados utilizando este campo tiveram como principal objetivo validar o modelo otimizador e as restrições impostas pelo problema. Uma vez que o campo é homogêneo, ao se alocar uma plataforma no centro do reservatório, espera-se, como solução inicial, uma simetria nas alternativas otimizadas. Com isso, os resultados obtidos foram comparados a um Caso Base.

### Caso Base

O Caso Base é uma situação hipotética, onde a plataforma é localizada no centro do reservatório e os poços são alocados num formato semelhante ao de uma estrela, respeitando a restrição do problema. Os parâmetros de restrição e de VPL utilizados podem ser vistos nas Tabelas Tabela 5.2 e Tabela 5.3, respectivamente.

**Tabela 5.2: Parâmetros de restrição do Caso Base do Campo-1**

| Parâmetros de restrição do Caso Base do Campo-1 |       |
|---|-------|
| Raio da plataforma                              | 1.000 |
| Lâmina d'água                                   | 300   |
| Distância mínima entre os poços                 | 200   |
| Comprimento Máximo do poço                      | 1.000 |
| Quantidade máxima de poços                      | 10    |
| Ângulo máximo de curvatura                      | 45°   |

**Tabela 5.3: Parâmetros de VPL do Caso Base do Campo-1**

| Parâmetros de VPL do Caso Base do Campo-1         |           |
|---|-----------|
| Preço do Óleo (US\$/bbl)                          | 70        |
| Preço do Gás (US\$/100m <sup>3</sup> )            | 1         |
| Custo da Plataforma (MMUS\$)                      | 1.000     |
| Custo de Linhas de Produção (MUS\$/km)            | 10        |
| Custo de Trecho Completado (US\$/m)               | 1.000     |
| Custo de Trecho Não Completado (MMUS\$/m)         | 0,0005    |
| Custo de Produção de Óleo (US\$/m <sup>3</sup> )  | 3         |
| Custo de Produção de Gás(US\$/100m <sup>3</sup> ) | 1         |
| Custo de Produção de Água (US\$/m <sup>3</sup> )  | 3         |
| Custo de Injeção de Água (US\$/m <sup>3</sup> )   | 2         |
| Manutenção anual do poço (US\$/poço)              | 1.000.000 |
| Alíquota de Impostos                              | 0,34      |
| TMA anual   | 0,10      |
| Royalties   | 0,10      |

A configuração de poços do Caso Base possui 9 poços, sendo 4 produtores e 5 injetores. Foram distribuídos 8 poços em torno da plataforma com os tipos de poços alternados, ora produtor ora injetor e um poço vertical do tipo injetor abaixo da plataforma. Esta configuração pode ser vista em 2D e 3D, respectivamente, nas Figuras Figura 5.3 e Figura 5.4 e com mais detalhes na Tabela 5.4.

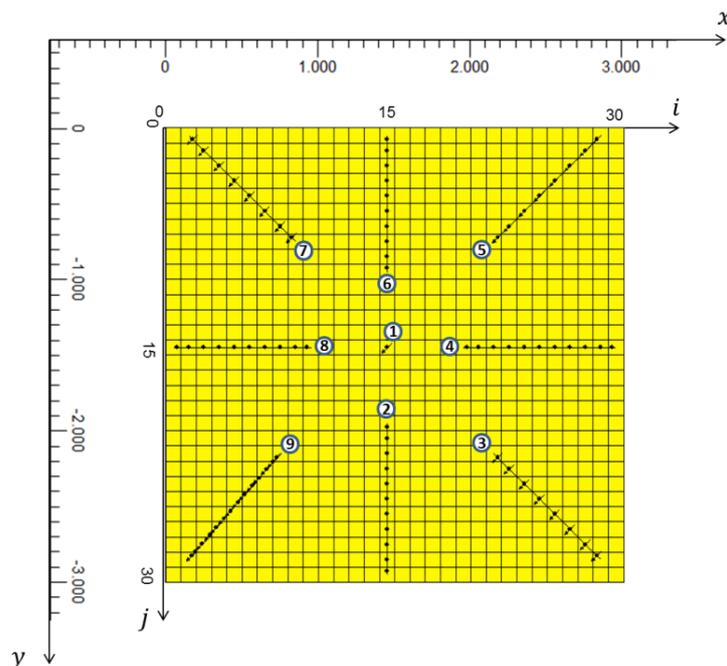


Figura 5.3: Configuração de poços do Caso Base do Campo-1 vista em 2D

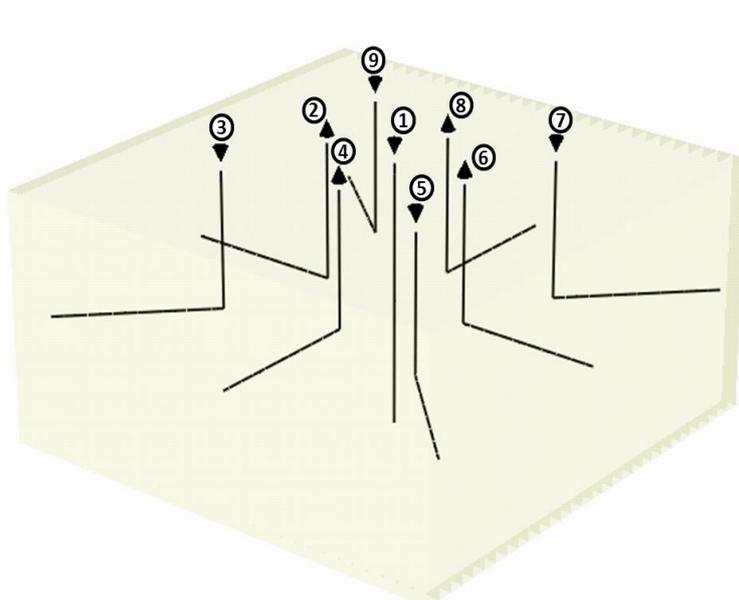


Figura 5.4: Configuração de poços do Caso Base do Campo-1 vista em 3D

Tabela 5.4: Configuração de poços do Caso Base do Campo-1

| Configuração de poços do Caso Base do Campo-1 |          |       |       |       |       |       |       |
|---|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nome  | Tipo     | $I_i$ | $J_i$ | $K_i$ | $I_f$ | $J_f$ | $K_f$ |
| Poço 1  | Injetor  | 15    | 15    | 1     | 15    | 15    | 1     |
| Poço 2  | Produtor | 15    | 20    | 1     | 15    | 30    | 1     |
| Poço 3  | Injetor  | 22    | 22    | 1     | 29    | 29    | 1     |
| Poço 4  | Produtor | 20    | 15    | 1     | 30    | 15    | 1     |
| Poço 5  | Injetor  | 22    | 8     | 1     | 29    | 1     | 1     |
| Poço 6  | Produtor | 15    | 10    | 1     | 15    | 1     | 1     |
| Poço 7  | Injetor  | 9     | 8     | 1     | 2     | 1     | 1     |
| Poço 8  | Produtor | 10    | 15    | 1     | 1     | 15    | 1     |
| Poço 9  | Injetor  | 8     | 22    | 1     | 2     | 29    | 1     |

Após a simulação do Caso Base, foi possível obter suas curvas de produção e injeção e a partir daí calcular o VPL. A Figura 5.5 mostra a curva de produção acumulada de óleo e água ao longo do desenvolvimento do campo. É possível verificar que, até o fim da concessão do campo, a produção de óleo acumulado permaneceu superior à produção acumulada de água.

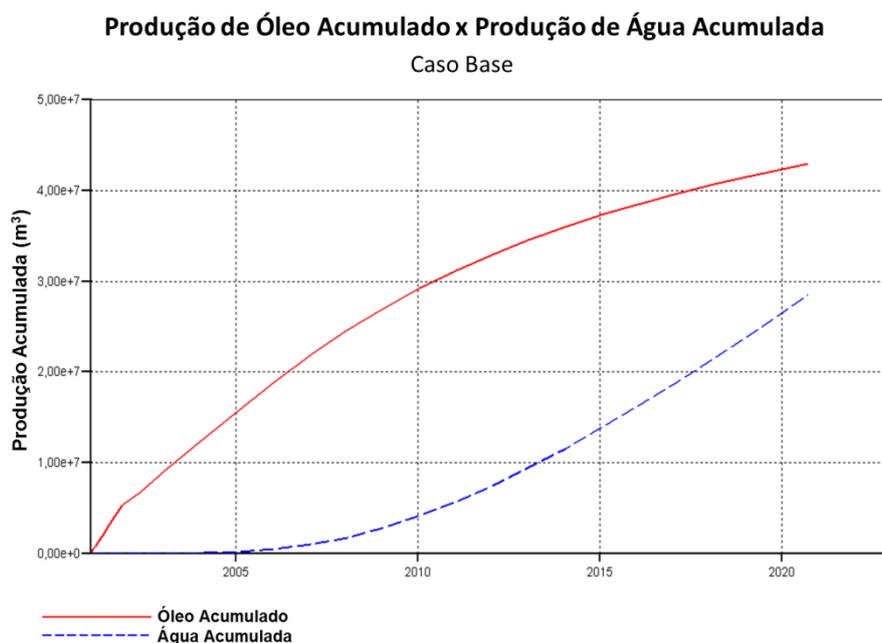


Figura 5.5: Curvas de produção acumulada de óleo e água do Caso Base do Campo-1

Para o cálculo do VPL o preço do óleo e do gás foi considerado constante ao longo da simulação. Os dados de produção e o VPL obtido podem ser vistos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Dados de produção e VPL do Caso Base do Campo-1

| Dados de produção e VPL do Caso Base do Campo-1 |                  |
|---|------------------|
| Produção acumulada de óleo (m <sup>3</sup> )    | 43.006.980,00    |
| Produção acumulada de gás (Mm <sup>3</sup> )    | 868.667.800,00   |
| Produção acumulada de água (m <sup>3</sup> )    | 28.541.600,00    |
| Injeção acumulada de água (m <sup>3</sup> )     | 71.998.000,00    |
| Valor Presente Líquido (US\$)                   | 5.062.288.884,43 |

Alguns testes foram feitos com o intuito de validar o modelo de solução e as restrições por ele impostas.

### 5.1.1 Teste-1

O Teste1 foi realizado com o objetivo de validar a restrição de localização dos pontos iniciais dentro do reservatório. Para isto foram definidos os parâmetros de evolução e de restrição, descritos nas Tabelas Tabela 5.6 e Tabela 5.7, respectivamente. Os parâmetros de VPL foram os mesmos utilizados no Caso Base.

Tabela 5.6: Parâmetros de evolução do Teste-1 do Campo-1

| Parâmetros de evolução do Teste-1 do Campo-1 |      |
|--|------|
| Tamanho da população                         | 100  |
| Número de gerações                           | 80   |
| Taxa inicial de Steady State                 | 0,40 |
| Taxa final de Steady State                   | 0,20 |
| Taxa inicial de cruzamento                   | 0,65 |
| Taxa final de cruzamento                     | 0,08 |
| Taxa inicial de mutação                      | 0,08 |
| Taxa final de mutação                        | 0,30 |

Tabela 5.7: Parâmetros de restrição do Teste-1 do Campo-1

| Parâmetros de restrição do Teste-1 do Campo-1 |       |
|---|-------|
| Raio da plataforma                            | 1.000 |
| Lâmina d'água                                 | 300   |
| Distância mínima entre os poços               | 200   |
| Comprimento Máximo do poço                    | 100   |
| Quantidade máxima de poços                    | 8     |
| Ângulo máximo de curvatura                    | 45°   |

O algoritmo encontrou uma alternativa com 8 poços verticais, sendo 4 produtores e 4 injetores e localizou a plataforma em  $x = 1500$  e  $y = 1700$ . Esta alternativa foi simulada e a produção de óleo encontrada foi de 22.979.020,00m<sup>3</sup> totalizando um VPL de US\$ 2.518.615.355,40. A configuração de poços encontrada pode ser vista em 3D na Figura 5.6 e detalhadamente na Tabela 5.8.

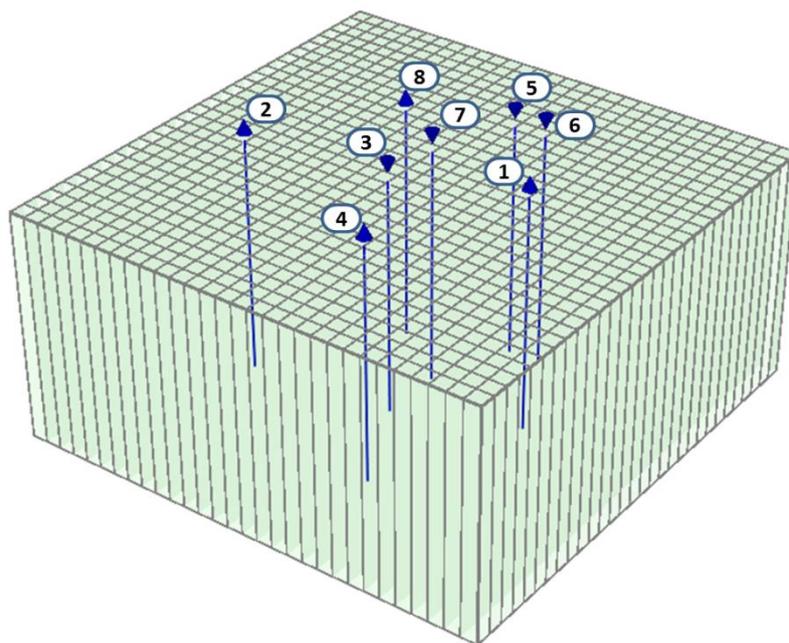


Figura 5.6: Configuração de poços do Teste-1 do Campo-1 vista em 3D

Tabela 5.8: Configuração de poços do Teste-1 do Campo-1

| Configuração de poços do Teste-1 do Campo-1 |          |       |       |       |       |       |       |
|---|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nome  | Tipo     | $I_i$ | $J_i$ | $K_i$ | $I_f$ | $J_f$ | $K_f$ |
| Poço 1                                      | Produtor | 17    | 22    | 1     | 17    | 22    | 1     |
| Poço 2                                      | Produtor | 13    | 6     | 1     | 13    | 6     | 1     |
| Poço 3                                      | Injetor  | 14    | 15    | 1     | 14    | 15    | 1     |
| Poço 4                                      | Produtor | 8     | 18    | 1     | 8     | 18    | 1     |
| Poço 5                                      | Injetor  | 23    | 17    | 1     | 23    | 17    | 1     |
| Poço 6                                      | Injetor  | 23    | 19    | 1     | 23    | 19    | 1     |
| Poço 7                                      | Injetor  | 18    | 15    | 1     | 18    | 15    | 1     |
| Poço 8                                      | Produtor | 21    | 11    | 1     | 21    | 11    | 1     |

De acordo com a distância mínima entre os poços, foi possível verificar que todos os poços se enquadraram dentro dos limites impostos. Além disso, com relação à localização dos pontos iniciais dos poços dentro do reservatório observou-se que todos os poços possuem a distância entre o ponto inicial e a plataforma menor que o raio de abrangência, Figura 5.7.

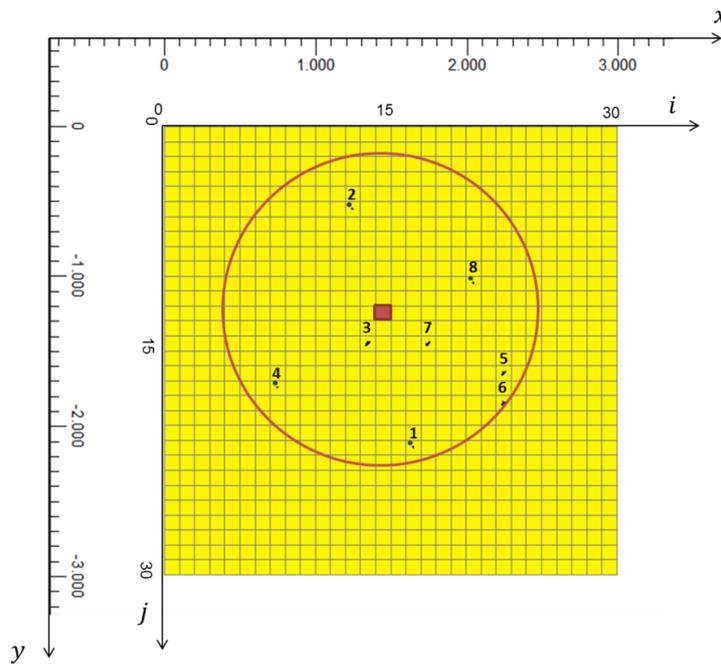


Figura 5.7: Pontos iniciais dos poços dentro do reservatório dos experimentos do Teste-1 do Campo-1

A curva de produção de óleo e água acumulada na superfície pode ser observada na Figura 5.8. É possível perceber que próximo ao ano de 2015 o nível de produção de água supera o nível de produção de óleo.

**Produção de Óleo Acumulado x Produção de Água Acumulada**  
Teste-1 do Campo-1

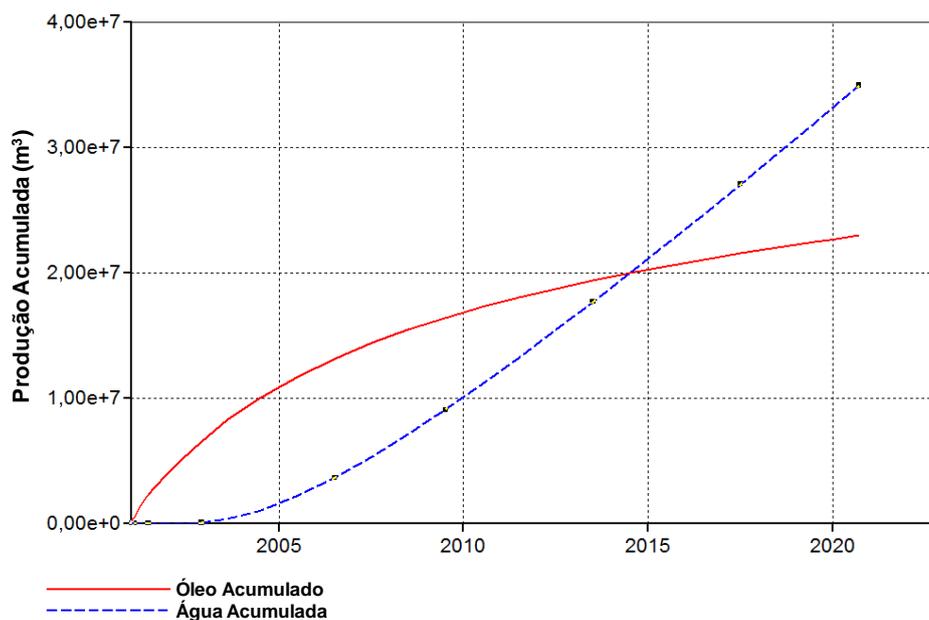


Figura 5.8: Curvas de produção acumulada de óleo e água do Teste-1 do Campo-1

Outros experimentos foram realizados e todas as alternativas encontradas satisfizeram as restrições de ponto inicial dos poços e distância mínima entre eles. Desta forma, o modelo de solução é capaz de encontrar alternativas válidas respeitando as restrições impostas pelo problema.

### 5.1.2 Teste-2

O Teste-2 tem como principal objetivo encontrar alternativas que respeitem, além das restrições verificadas no Teste-1, a restrição de tamanho máximo do poço. Para este teste foram utilizados os mesmos parâmetros do Teste-1, porém o comprimento máximo dos poços foi alterado de 100 metros para 1.000 metros.

O algoritmo encontrou uma alternativa com 8 poços, sendo 4 produtores e 4 injetores, onde 3 de cada tipo de poço são do tipo horizontal. Os poços horizontais tiveram seu comprimento total avaliado e nenhum dos poços ultrapassou o limite máximo de 1.000 metros. Esta configuração pode ser vista em 3D na Figura 5.9, em 2D na Figura 5.10 e detalhadamente na Tabela 5.9.

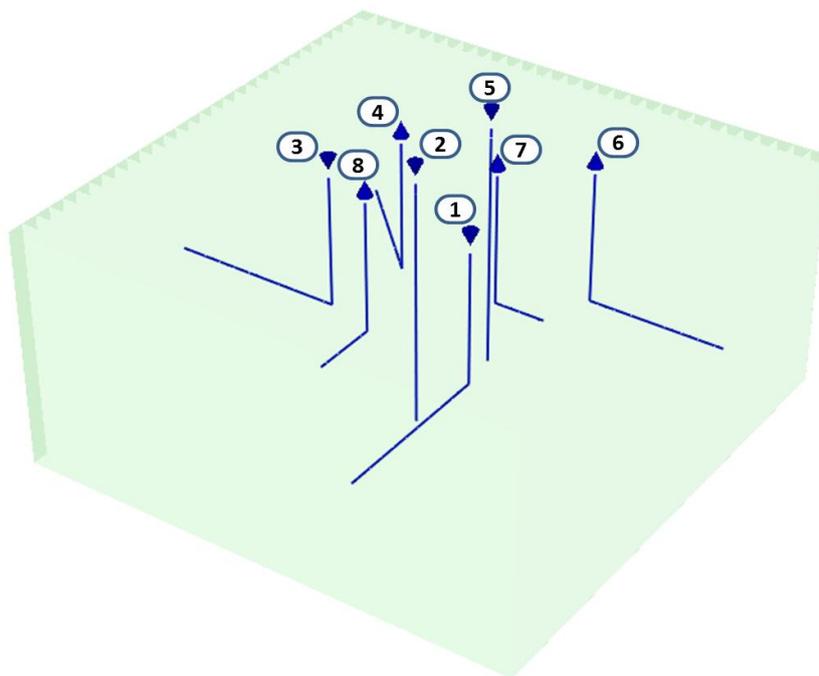


Figura 5.9: Configuração de poços do Teste-2 do Campo-1 vista em 3D

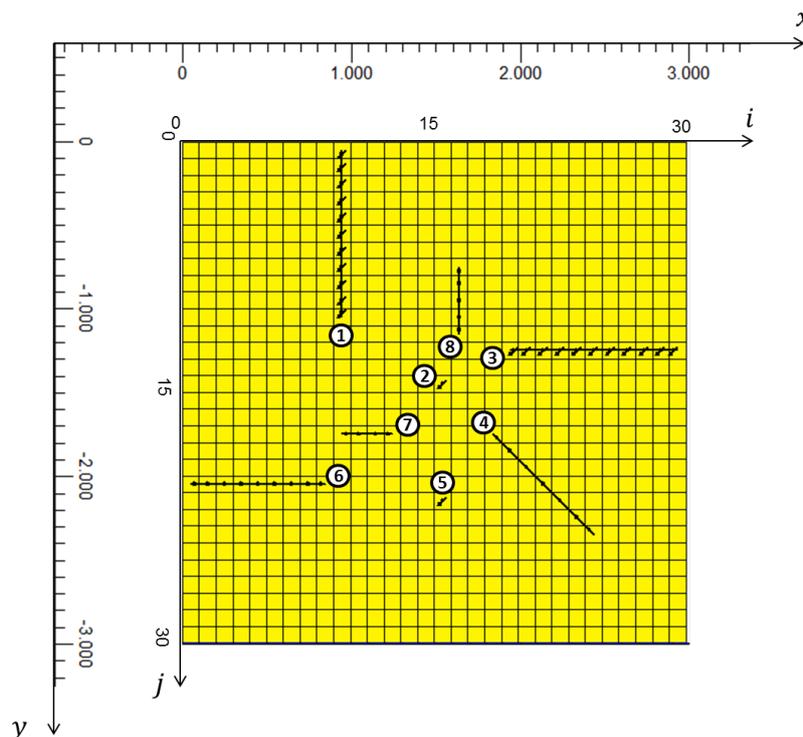


Figura 5.10: Configuração de poços do Teste-2 do Campo-1 vista em 2D

Tabela 5.9: Configuração de poços do Teste-2 do Campo-1

| Configuração de poços do Teste-2 do Campo-1 |          |       |       |       |       |       |       |
|---|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nome  | Tipo     | $I_i$ | $J_i$ | $K_i$ | $I_f$ | $J_f$ | $K_f$ |
| Poço 1                                      | Injetor  | 10    | 11    | 1     | 10    | 1     | 1     |
| Poço 2                                      | Injetor  | 16    | 15    | 1     | 16    | 15    | 1     |
| Poço 3                                      | Injetor  | 20    | 13    | 1     | 30    | 13    | 1     |
| Poço 4                                      | Produtor | 19    | 18    | 1     | 25    | 24    | 1     |
| Poço 5                                      | Injetor  | 16    | 22    | 1     | 16    | 22    | 1     |
| Poço 6                                      | Produtor | 9     | 21    | 1     | 1     | 21    | 1     |
| Poço 7                                      | Produtor | 13    | 13    | 1     | 10    | 18    | 1     |
| Poço 8                                      | Produtor | 17    | 12    | 1     | 17    | 8     | 1     |

Os poços horizontais possibilitam a exposição de longos trechos do reservatório aumentando a produtividade. Desta forma, comparou-se as curvas de produção de óleo e água obtidas no Teste-1 com as obtidas no Teste-2. Além disso, foi comparado o VPL obtido em ambos os testes.

A produção de óleo e água acumulada do Teste-2, conforme Figura 5.11, apresentou melhorias em relação às curvas de produção do Teste-1. No Teste-1 a produção de água superou a produção de óleo próximo ao ano de 2015, já no Teste-2 a produção de óleo se manteve superior até o ano de 2020, aproximadamente.

### Produção de Óleo Acumulado x Produção de Água Acumulada Teste-2 do Campo-1

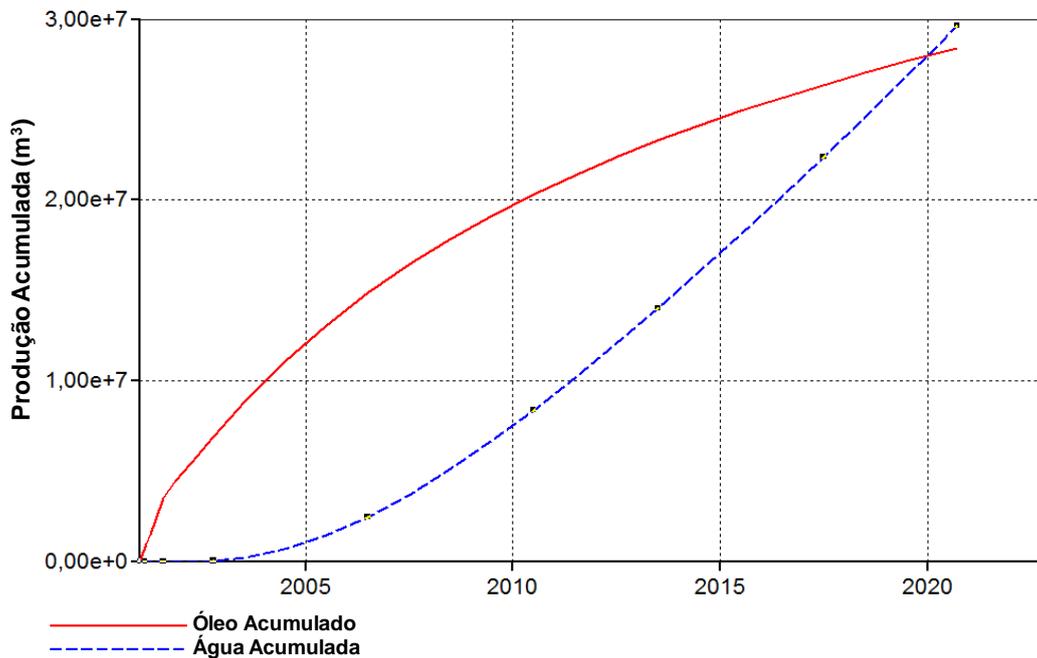


Figura 5.11: Curvas de produção acumulada de óleo e água do Teste-2 do Campo-1

O Teste-2 produziu 28.400.890,00m<sup>3</sup> de óleo acumulado, 24% a mais que a alternativa otimizada no Teste-1. Em relação ao VPL, o Teste-2 apresentou um aumento de 27% em relação ao Teste-1, sendo de US\$ 3.187.249.582,57, Esses dados podem ser vistos graficamente na Figura 5.12.

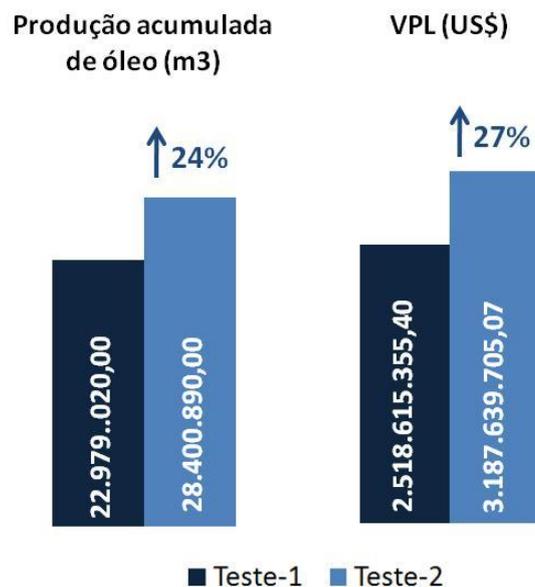


Figura 5.12: Produção acumulada de óleo e VPL do Teste-2 comparado ao Teste-1 do Campo-1

### 5.1.3 Teste-3

Uma vez que o modelo de solução considera poços com completação seca, a localização dos pontos iniciais dos poços fica limitada ao raio de abrangência da plataforma. Diante disso e uma vez que o Campo-1 é homogêneo, espera-se que o modelo de solução seja capaz de encontrar a plataforma mais próxima possível do centro do reservatório, a fim de drenar o reservatório de maneira homogênea.

Sendo assim, para verificar a capacidade do modelo em alocar a plataforma na melhor posição possível, foram realizados dez experimentos e verificou-se as coordenadas  $i$  e  $j$  de cada um deles. Para estes experimentos foram utilizados os mesmos parâmetros do Teste-2.

A Figura 5.13 mostra a localização das plataformas encontradas nos experimentos realizados. O ponto  $i = 15$  e  $j = 15$  foi definido como um alvo, representando a localização ideal da plataforma. Os experimentos 1, 3, 6, 7 e 8 encontraram coordenadas mais próximas do alvo. Já os experimentos 2, 4, 5, 9 e 10 foram os que mais se afastaram do alvo.

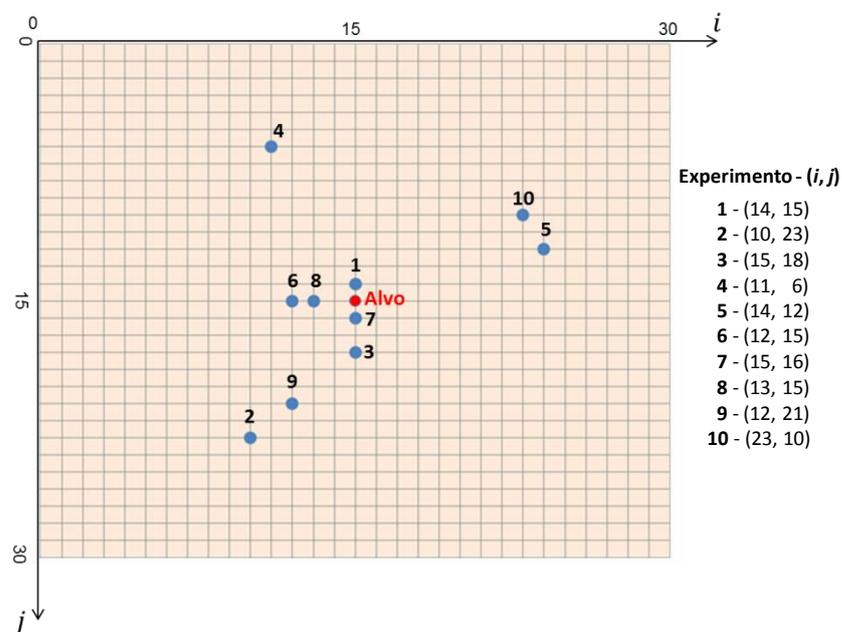


Figura 5.13: Posição da plataforma de dez experimentos do Teste-3 do Campo-1

Levando em consideração a aleatoriedade do modelo de solução, calculou-se a média e o desvio-padrão dos resultados obtidos. A média das coordenadas encontradas foi igual a 15 para o eixo  $i$  e  $j$ . Sendo assim, pode-se dizer que, em média, o modelo é capaz de alocar a plataforma no centro do reservatório.

A partir daí, foi calculado o desvio-padrão de cada coordenada e observou-se que, desviando de 5,75 o eixo  $i$  variou 19% em relação ao reservatório e o eixo  $j$  apresentou um desvio de 5,01, representando 17%, uma vez que a malha possui 30 blocos em cada direção. Em outras palavras, a localização da plataforma variou, aproximadamente, 550 metros em relação ao centro do reservatório.

Desta maneira, pode-se dizer que o algoritmo é capaz de otimizar a localização da plataforma com êxito, respeitando as restrições impostas pelo problema.

#### 5.1.4 Teste-4

O sistema desenvolvido permite a utilização do conhecimento prévio, ou seja, é possível se aproveitar alternativas conhecidas e evoluir a partir delas, como *semente inicial*. Essa alternativa é importante quando a avaliação tem um alto custo computacional porque, além de possibilitar a adição do conhecimento do especialista, permite iniciar novos experimentos a partir de resultados obtidos em experimentos anteriores, favorecendo encontrar melhores soluções.

Sendo assim, para que o modelo otimizado neste teste pudesse encontrar soluções ainda melhores que as encontradas nos testes anteriores, foi utilizada como *semente inicial*, a melhor alternativa encontrada no Teste-2. Além disso, foram feitas 5 rodadas com 80 gerações cada, utilizando uma população inicial com 100 indivíduos gerados aleatoriamente. Com o intuito de comparar este teste com o Caso Base, fixou-se um número máximo de 9 poços. Os outros parâmetros foram os mesmos definidos no Teste-2.

O melhor VPL encontrado neste teste foi de US\$ 5.184.362.081,85, correspondente a um volume de óleo acumulado de 41.882.050 m<sup>3</sup>. A configuração de poços encontrada, possui 6 poços injetores e 3 poços produtores. Esta configuração pode ser visualizada na Figura 5.14 em 3D e na Figura 5.15 em 2D, além disso é possível visualizar esta configuração mais detalhadamente na Tabela 5.10.

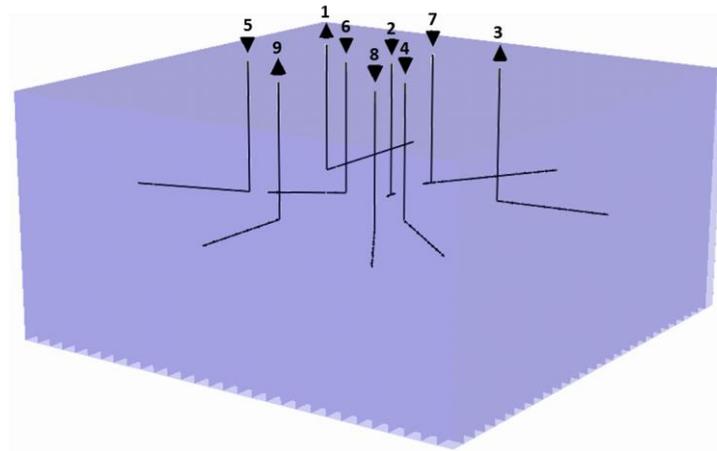


Figura 5.14: Configuração de poços do Teste-4 do Campo-1 vista em 3D

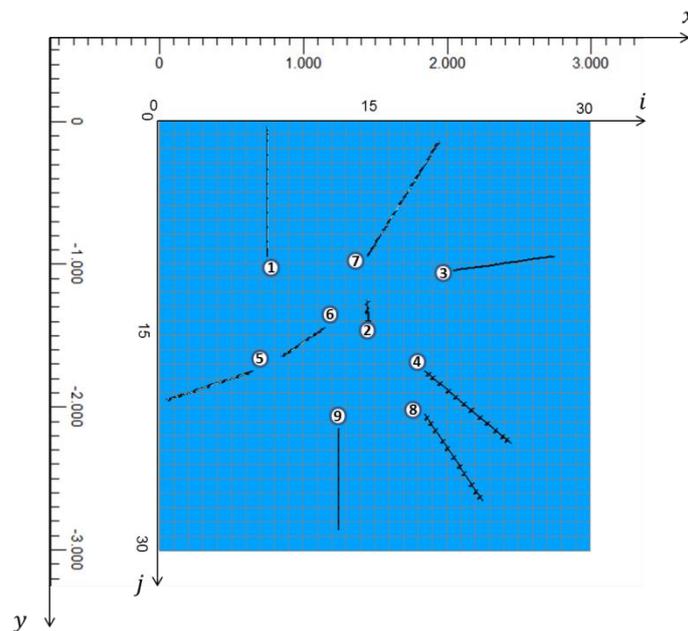


Figura 5.15: Configuração de poços do Teste-4 do Campo-1 vista em 2D

Tabela 5.10: Configuração de poços do Teste-4 do Campo-1

| Configuração de poços do Teste-4 do Campo-1 |          |       |       |       |       |       |       |
|---|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nome  | Tipo     | $I_i$ | $J_i$ | $K_i$ | $I_f$ | $J_f$ | $K_f$ |
| Poço 1                                      | Produtor | 8     | 10    | 1     | 8     | 1     | 1     |
| Poço 2                                      | Injetor  | 15    | 14    | 1     | 15    | 13    | 1     |
| Poço 3                                      | Produtor | 21    | 11    | 1     | 28    | 10    | 1     |
| Poço 4                                      | Injetor  | 19    | 18    | 1     | 25    | 23    | 1     |
| Poço 5                                      | Injetor  | 7     | 18    | 1     | 1     | 20    | 1     |
| Poço 6                                      | Injetor  | 12    | 15    | 1     | 9     | 17    | 1     |
| Poço 7                                      | Injetor  | 15    | 20    | 1     | 20    | 2     | 1     |
| Poço 8                                      | Injetor  | 19    | 21    | 1     | 23    | 27    | 1     |
| Poço 9                                      | Produtor | 13    | 22    | 1     | 13    | 29    | 1     |

O gráfico da Figura 5.16 mostra a curva de produção acumulada de óleo e água durante a concessão do campo. É possível visualizar que a produção de óleo se manteve superior a produção de água até o ano de 2020, aproximadamente.

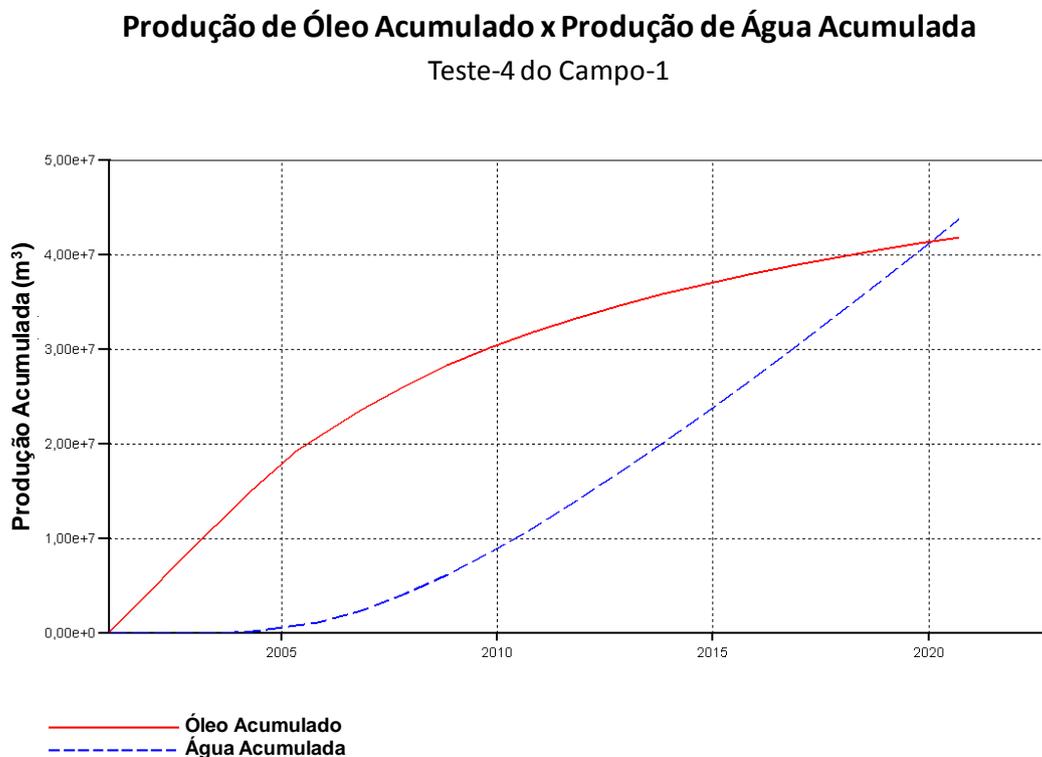


Figura 5.16: Curvas de produção acumulada de óleo e água do Teste-4 do Campo-1

Comparando o Teste-4 com o Caso Base, foi possível verificar que a produção de óleo reduziu 3%. Contudo, o Teste-4 apresentou um VPL de US\$ 5.184.354.031,54, representando um aumento de 2%. Isso pode ser justificado pela redução no investimento em 0,2%. Estes valores podem ser vistos detalhadamente na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Dados comparativos do Teste-4 em relação ao Caso Base do Campo-1

| Dados comparativos do Teste-4 em relação ao Caso Base do Campo-1 |                  |            |
|--|------------------|------------|
| Nome   | Valor            | Percentual |
| Produção de Óleo Caso Base (m <sup>3</sup> )                     | 43.006.980,00    |            |
| Produção de Óleo Teste-4 (m <sup>3</sup> )                       | 41.882.050,00    | -3%        |
| VPL Caso Base (US\$)   | 5.062.288.884,43 |            |
| VPL Teste-4 (US\$)   | 5.184.354.031,54 | 2%         |
| Investimento do Caso Base (US\$)                                 | 1.013.252.646,56 |            |
| Investimento do Teste-4 (US\$)                                   | 1.011.195.070,17 | -0,2%      |

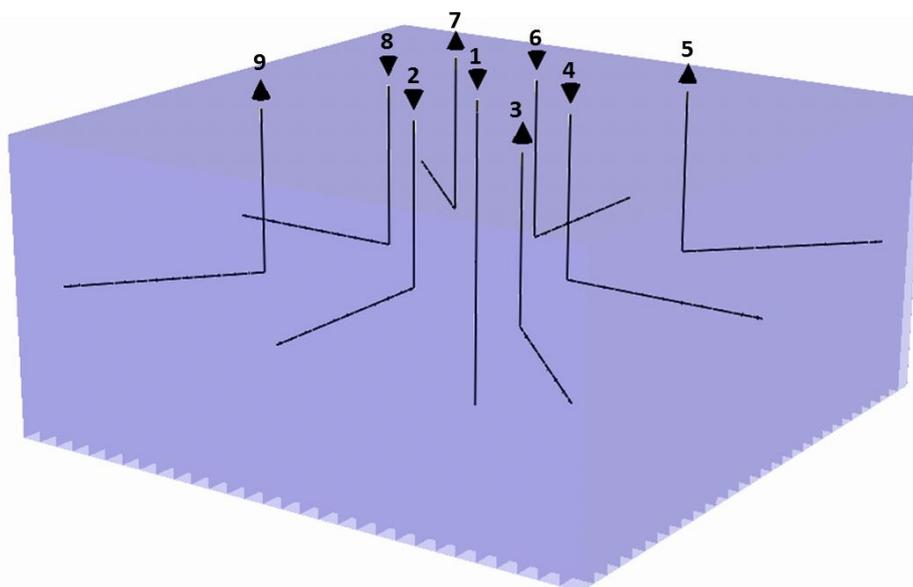
### 5.1.5 Teste-5

O Teste-5 utilizou Caso Base como *semente inicial* a fim de testar a evolução do modelo a partir da alternativa de um especialista. Os parâmetros de restrição e de VPL foram os mesmos utilizados no Caso Base e os parâmetros de evolução pode ser visto na Tabela 5.12, ressaltando que a quantidade máxima de poços foi fixada em até 9 poços para fins comparativos.

A configuração de poços encontrou 4 poços produtores e 5 poços injetores com a plataforma localizada no centro do reservatório, conforme Figura 5.17 e Tabela 5.13.

**Tabela 5.12: Parâmetros de evolução do Teste-5 do Campo-1**

| Parâmetros de evolução do Teste-5 do Campo-1 |      |
|--|------|
| Tamanho da população                         | 100  |
| Número de gerações                           | 80   |
| Taxa inicial de Steady State                 | 0.40 |
| Taxa final de Steady State                   | 0.20 |
| Taxa inicial de cruzamento                   | 0.65 |
| Taxa final de cruzamento                     | 0.08 |
| Taxa inicial de mutação                      | 0.08 |
| Taxa final de mutação                        | 0.30 |



**Figura 5.17: Configuração de poços do Teste-5 do Campo-1**

Tabela 5.13: Configuração de poços do Teste-5 do Campo-1

| Configuração de poços do Teste-5 do Campo-1 |          |       |       |       |       |       |       |
|---|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nome  | Tipo     | $I_i$ | $J_i$ | $K_i$ | $I_f$ | $J_f$ | $K_f$ |
| Poço 1                                      | Injetor  | 15    | 15    | 1     | 15    | 15    | 1     |
| Poço 2                                      | Injetor  | 15    | 20    | 1     | 15    | 30    | 1     |
| Poço 3                                      | Produtor | 22    | 22    | 1     | 29    | 29    | 1     |
| Poço 4                                      | Injetor  | 20    | 15    | 1     | 30    | 15    | 1     |
| Poço 5                                      | Produtor | 22    | 8     | 1     | 29    | 1     | 1     |
| Poço 6                                      | Injetor  | 15    | 10    | 1     | 15    | 1     | 1     |
| Poço 7                                      | Produtor | 9     | 8     | 1     | 2     | 1     | 1     |
| Poço 8                                      | Injetor  | 10    | 15    | 1     | 1     | 15    | 1     |
| Poço 9                                      | Produtor | 8     | 22    | 1     | 2     | 29    | 1     |

A produção de óleo se manteve superior à produção de água até o fim da concessão do campo, de acordo com o gráfico da Figura 5.18. O VPL do projeto foi de US\$ 5.510.089.609,69 e os valores de produção e injeção estão descritos na Tabela 5.14.

Produção de Óleo Acumulado x Produção de Água Acumulada  
Teste 5 do Campo 1

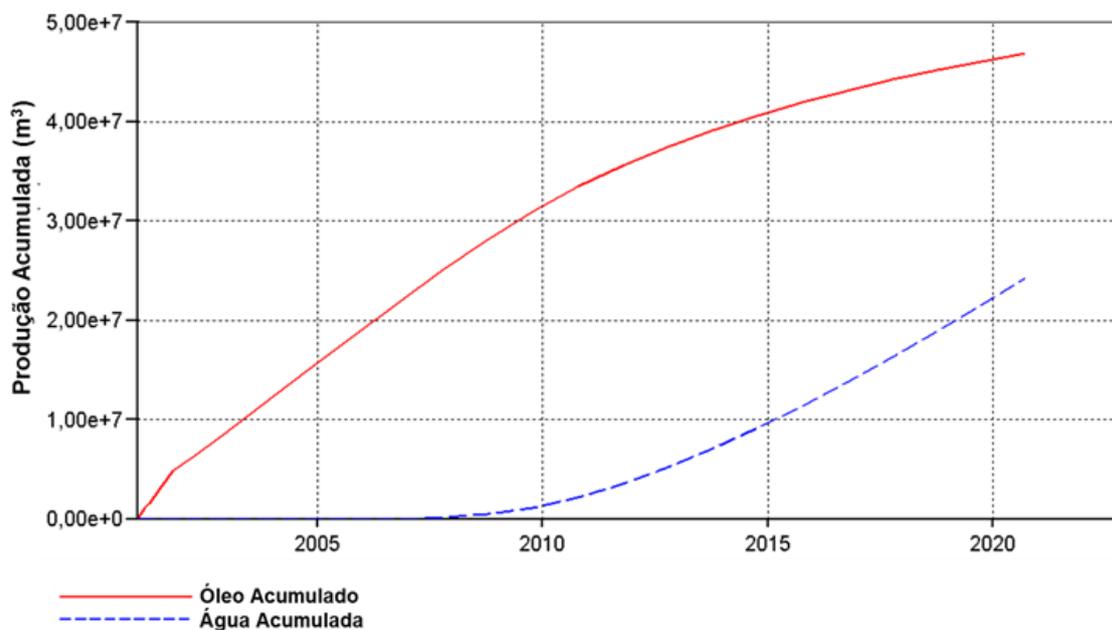


Figura 5.18: Curvas de produção acumulada de óleo e água do Teste-5 do Campo-1

Tabela 5.14: Dados de produção e VPL do Teste-5 do Campo-1

| Dados de produção e VPL do Teste-5 do Campo-1 |                  |
|---|------------------|
| Produção acumulada de óleo (m <sup>3</sup> )  | 45,879,000.00    |
| Produção acumulada de gás (Mm <sup>3</sup> )  | 945,812,900.00   |
| Produção acumulada de água (m <sup>3</sup> )  | 24,292,180.00    |
| Injeção acumulada de água (m <sup>3</sup> )   | 71,941,000.00    |
| Valor Presente Líquido (US\$)                 | 5,510,089,609.69 |

Comparando os resultados obtidos com o Caso Base e o Teste-4, percebeu-se um aumento de 9% no VPL e 7% na produção acumulada de óleo em relação ao Caso Base e um aumento de 6% no VPL e 10% na produção acumulada de óleo ao compará-lo com o Teste-5, conforme o gráfico da Figura 5.19 e com mais detalhes na Tabela 5.15. Desta maneira, ao otimizar o modelo considerando alternativas geradas por um especialista, é possível encontrar resultados ainda melhores aos otimizados sem alguma informação inicial, ou seja, o modelo de solução é capaz de auxiliar a tomada de decisão do especialista considerando suas premissas.

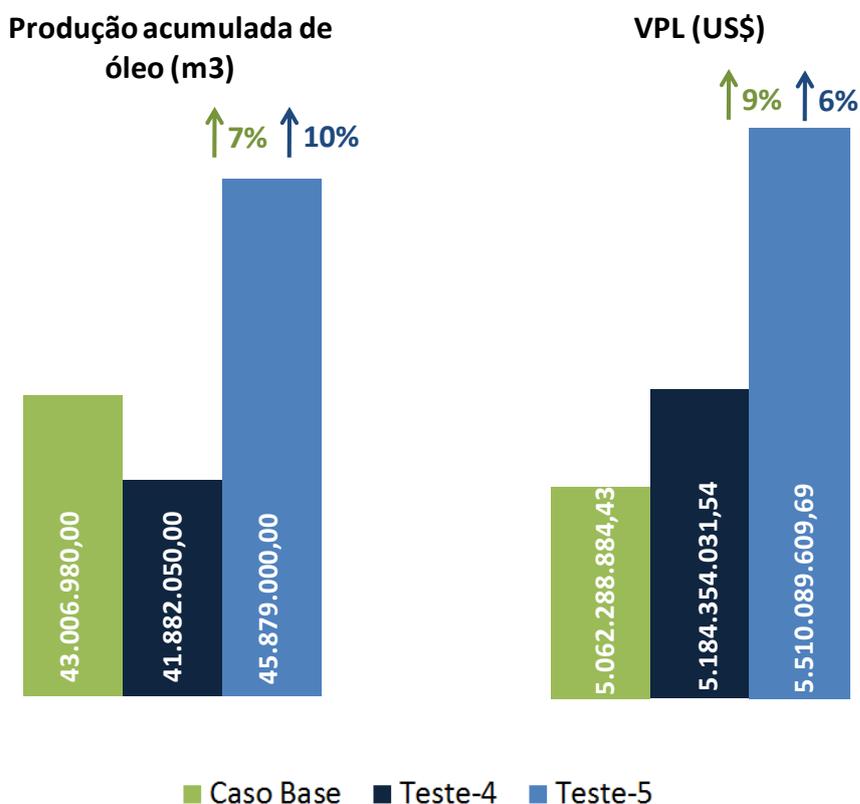


Figura 5.19: Gráfico comparativo do VPL e dados de produção acumulada de óleo do Teste-5 em relação ao Caso Base e ao Teste-4 do Campo-1

Tabela 5.15: Dados comparativos do Teste-5 em relação ao Caso Base e ao Teste-4 do Campo-1

| Dados Comparativos do Teste-5 em relação ao Caso Base e ao Teste-4 do Campo-1 |                  |                  |            |                  |            |
|---|------------------|------------------|------------|------------------|------------|
| Nome  | Teste-5          | Caso Base        | Percentual | Teste-4          | Percentual |
| Produção acumulada de óleo (m <sup>3</sup> )                                  | 45.879.000,00    | 43.006.980,00    | 7%         | 41.882.050,00    | 10%        |
| Produção acumulada de gás (Mm <sup>3</sup> )                                  | 945.812.900,00   | 868.667.800,00   | 9%         | 845.371.900,00   | 12%        |
| Produção acumulada de água (m <sup>3</sup> )                                  | 24.292.180,00    | 28.541.600,00    | -15%       | 43.873.450,00    | -45%       |
| Injeção acumulada de água (m <sup>3</sup> )                                   | 71.941.000,00    | 71.998.000,00    | 0%         | 86.316.000,00    | -17%       |
| Valor Presente Líquido (US\$)   | 5.510.089.609,69 | 5.062.288.884,43 | 9%         | 5.184.354.031,54 | 6%         |

## 5.2 Modelo de Reservatório Sintético Heterogêneo

O Campo-2 consiste em um modelo de reservatório heterogêneo com uma malha de 33x57x3 blocos, nas direções  $i$ ,  $j$ ,  $k$ ; cujas dimensões são de aproximadamente 100,0x100,0x8,66 metros. Os valores permeabilidade são de 575,0 md nas direções  $i$  e  $j$  e 57,40 md na direção  $k$  e a porosidade é de 0,23.

Uma característica deste modelo é a existência de barreiras com baixa porosidade que dificultam a passagem dos poços por essas regiões. Desta forma, a utilização de poços com completação seca não seria viável, pois os poços não seriam capazes de explorar completamente o campo. Desta maneira, a utilização deste modelo de reservatório se dá apenas para fins de validação das restrições impostas pelo modelo. A Figura 5.20 apresenta uma visão em 3D do modelo do reservatório em relação a sua porosidade.

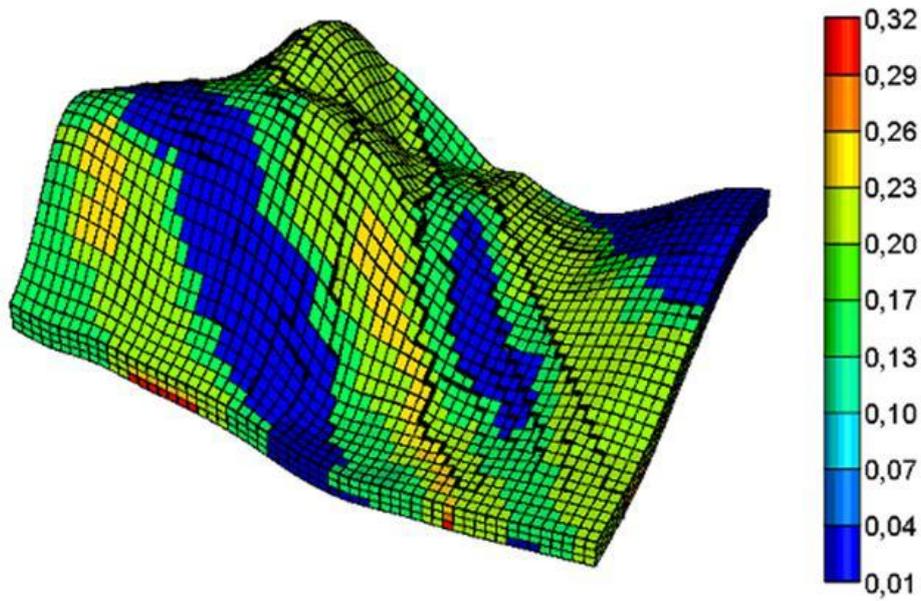


Figura 5.20: Campo-2 visto em 3D

A concessão deste campo se inicia em janeiro de 2011 e termina em dezembro de 2035, totalizando 25 anos para o desenvolvimento desta reserva. Algumas restrições foram consideradas em relação ao reservatório, como a pressão de fundo de poço (BHP), taxa máxima de produção de óleo (STO) e taxa máxima de injeção de água (STW). Os valores utilizados podem ser vistos na Tabela 5.16.

Tabela 5.16: Restrições do Campo-2

| Restrições do Campo 2   |     |                           |
|-------------------------|-----|---------------------------|
| <b>Poços Produtores</b> |     |                           |
| STO                     | Máx | 3.000 m <sup>3</sup> /dia |
| BHP                     | Min | 55 kg/cm <sup>2</sup>     |
| <b>Poços Injetores</b>  |     |                           |
| STW                     | Máx | 3.000 m <sup>3</sup> /dia |
| BHP                     | Máx | 450 kg/cm <sup>2</sup>    |

### 5.2.1 Teste-1

Como o Campo-1 possui apenas uma camada na direção  $k$ , utilizou-se o modelo de reservatório Campo-2 para validar a restrição de ângulo máximo de curvatura dos poços. Desta maneira, o principal objetivo deste teste é validar esta restrição, que permite um ângulo de curvatura de até  $45^\circ$ . Os parâmetros de restrição e evolução podem ser visualizados nas Tabelas Tabela 5.17 e Tabela 5.18, respectivamente.

**Tabela 5.17: Parâmetros de restrição do Teste-1 do Campo-2**

| Parâmetros de restrição do Teste-1 do Campo-2 |            |
|---|------------|
| Raio da plataforma                            | 1.000      |
| Lâmina d'água                                 | 800        |
| Distância mínima entre os poços               | 200        |
| Comprimento Máximo do poço                    | 1.000      |
| Quantidade máxima de poços                    | 8          |
| Ângulo máximo de curvatura                    | $45^\circ$ |

**Tabela 5.18: Parâmetros de evolução do Teste-1 do Campo-2**

| Parâmetros de evolução do Teste-1 do Campo-2 |      |
|--|------|
| Tamanho da população                         | 100  |
| Número de gerações                           | 80   |
| Taxa inicial de Steady State                 | 0,40 |
| Taxa final de Steady State                   | 0,20 |
| Taxa inicial de cruzamento                   | 0,65 |
| Taxa final de cruzamento                     | 0,08 |
| Taxa inicial de mutação                      | 0,08 |
| Taxa final de mutação                        | 0,30 |

Neste teste a plataforma foi definida fixa no centro do reservatório com  $i = 17$  e  $j = 29$  e a quantidade máxima de poços foi limitada em até 8 poços. Foram realizados vários experimentos e todos apresentaram ângulo de curvatura dos poços menores que  $45^\circ$ . A melhor alternativa otimizada encontrou 4 poços injetores e 4 poços produtores. A configuração de poços com seus respectivos ângulos de curvatura pode ser vista na Tabela 5.19.

Tabela 5.19: Configuração de poços do Teste-1 do Campo-2

| Configuração de poços do Teste-1 do Campo-2 |          |       |       |       |       |       |       |        |
|---|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Nome  | Tipo     | $I_i$ | $J_i$ | $K_i$ | $I_f$ | $J_f$ | $K_f$ | Ângulo |
| Poço 1                                      | Produtor | 18    | 20    | 1     | 21    | 13    | 2     | 17°    |
| Poço 2                                      | Injetor  | 21    | 25    | 1     | 29    | 24    | 1     | 39°    |
| Poço 3                                      | Produtor | 21    | 32    | 2     | 28    | 37    | 2     | 22°    |
| Poço 4                                      | Produtor | 22    | 28    | 2     | 24    | 27    | 2     | 26°    |
| Poço 5                                      | Produtor | 18    | 31    | 2     | 18    | 34    | 3     | 33°    |
| Poço 6                                      | Injetor  | 13    | 27    | 2     | 12    | 26    | 3     | 19°    |
| Poço 7                                      | Injetor  | 15    | 32    | 1     | 13    | 35    | 1     | 16°    |
| Poço 8                                      | Injetor  | 16    | 28    | 3     | 16    | 28    | 3     | 0°     |

Além das alternativas respeitarem todas as outras restrições impostas pelo problema, elas respeitam a restrição de ângulo máximo de curvatura dos poços. Desta maneira, é possível afirmar que o modelo de solução respeita todas as restrições por ele impostas.

### 5.3 Modelo de Reservatório Real

O Campo-2 baseia-se em um modelo de reservatório real. É um reservatório de arenito consolidado, representado por uma malha do tipo Corner Point de 83x45x23 blocos, nas direções  $i$ ,  $j$ ,  $k$ , totalizando 85.905 blocos. A permeabilidade e a porosidade do reservatório são heterogêneas por todo o campo e a saturação de água fica em torno de 0,25 em todo o reservatório.

Este campo apresenta um aquífero na parte mais profunda, permitindo ao reservatório produzir com mecanismo de produção de influxo de água. A Figura 5.21 ilustra o Campo-2 em 3D com relação a sua porosidade.

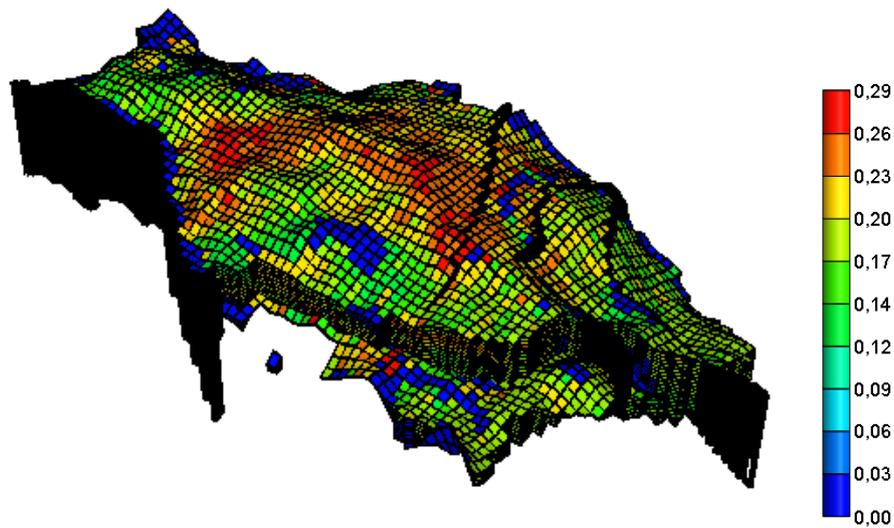


Figura 5.21: Campo-3 visto em 3D

Os testes realizados neste campo possuem no início da produção poços produtores surgentes e como método de recuperação secundária, foi utilizada a injeção de água. A concessão deste campo se inicia em janeiro de 2001 e termina em dezembro de 2032, totalizando 32 anos para o desenvolvimento dessa reserva.

Algumas restrições foram consideradas em relação ao reservatório, como a pressão de fundo de poço (BHP), taxa máxima de produção de líquido (STL) e taxa máxima de injeção de água (STW). Os valores utilizados podem ser vistos na Tabela 5.20.

Tabela 5.20: Restrições do Campo-3

| Restrições do Campo 3   |     |                           |
|-------------------------|-----|---------------------------|
| <b>Poços Produtores</b> |     |                           |
| STL                     | Máx | 1.800 m <sup>3</sup> /dia |
| BHP                     | Min | 180 kg/cm <sup>2</sup>    |
| <b>Poços Injetores</b>  |     |                           |
| STW                     | Máx | 3.000 m <sup>3</sup> /dia |
| BHP                     | Máx | 350 kg/cm <sup>2</sup>    |

### Caso Base

Para este modelo de reservatório real, foi definido um Caso Base pelo especialista, onde a configuração de poços é composta de 4 poços produtores e 4 poços injetores, totalizando 8 poços e uma plataforma no centro do reservatório. A Figura 5.22 mostra esta configuração em 3D e a localização dos poços detalhadamente pode ser vista na Tabela 5.21.

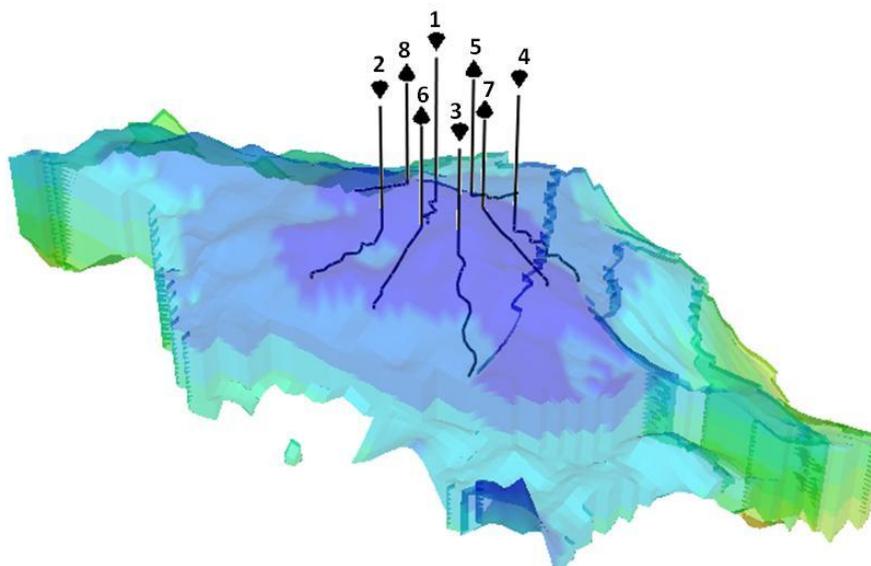


Figura 5.22: Configuração de poços do Caso Base do Campo-3 vista em 3D

Tabela 5.21: Configuração de poços do Caso Base do Campo-3

| Configurações de poços do Caso Base do Campo-3 |          |       |       |       |       |       |       |
|--|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nome   | Tipo     | $I_i$ | $J_i$ | $K_i$ | $I_f$ | $J_f$ | $K_f$ |
| Poço 1   | Injetor  | 38    | 16    | 5     | 35    | 13    | 11    |
| Poço 2   | Injetor  | 38    | 24    | 5     | 34    | 28    | 11    |
| Poço 3   | Injetor  | 46    | 24    | 5     | 51    | 29    | 11    |
| Poço 4   | Injetor  | 46    | 16    | 5     | 50    | 12    | 11    |
| Poço 5   | Produtor | 42    | 16    | 1     | 42    | 10    | 5     |
| Poço 6   | Produtor | 42    | 24    | 1     | 42    | 30    | 6     |
| Poço 7   | Produtor | 46    | 20    | 1     | 52    | 20    | 5     |
| Poço 8   | Produtor | 38    | 20    | 1     | 33    | 20    | 5     |

Os parâmetros de restrição e de VPL utilizados para definir e simular a alternativa podem ser vistos através das Tabelas Tabela 5.22 e Tabela 5.23, respectivamente. Após a simulação da alternativa, foi possível verificar um VPL de US\$ 2.314.198.166,01. Além disso, conforme o gráfico da Figura 5.23, as curvas de produção de óleo e água se mostraram razoáveis, mantendo o reservatório produtivo por aproximadamente 15 anos.

**Tabela 5.22: Parâmetros de restrição do Caso Base do Campo-3**

| Parâmetros de restrição do Caso Base do Campo-3 |       |
|---|-------|
| Raio da plataforma                              | 1.000 |
| Lâmina d'água                                   | 800   |
| Distância mínima entre os poços                 | 200   |
| Comprimento Máximo do poço                      | 1.000 |
| Ângulo máximo de curvatura                      | 45°   |

**Tabela 5.23: Parâmetros de VPL do Caso Base do Campo-3**

| Parâmetros de VPL do Caso Base do Campo-3         |           |
|---|-----------|
| Preço do Óleo (US\$/bbl)                          | 70        |
| Preço do Gás (US\$/100m <sup>3</sup> )            | 1         |
| Custo da Plataforma (MMUS\$)                      | 1.000     |
| Custo de Linhas de Produção (MUS\$/km)            | 10        |
| Custo de Trecho Completado (US\$/m)               | 1.000     |
| Custo de Trecho Não Completado (MMUS\$/m)         | 0,0005    |
| Custo de Produção de Óleo (US\$/m <sup>3</sup> )  | 3         |
| Custo de Produção de Gás(US\$/100m <sup>3</sup> ) | 1         |
| Custo de Produção de Água (US\$/m <sup>3</sup> )  | 3         |
| Custo de Injeção de Água (US\$/m <sup>3</sup> )   | 2         |
| Manutenção anual do poço (US\$/poço)              | 1.000.000 |
| Alíquota de Impostos                              | 0,34      |
| TMA anual   | 0,10      |
| Royalties   | 0,10      |

### Produção de Óleo Acumulado x Produção de Água Acumulada

Caso Base Campo-3

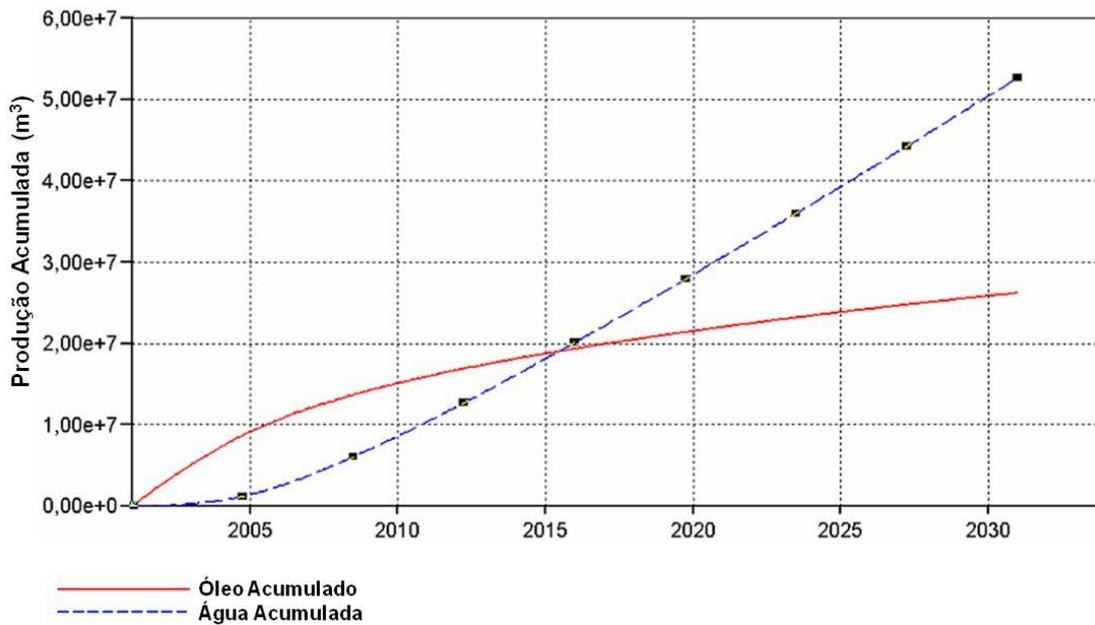


Figura 5.23: Curvas de produção acumulada de óleo e água do Caso Base do Campo-3

Para o cálculo do VPL o preço do óleo e do gás foi considerado constante ao longo da simulação, sendo de US\$ 70,00 por barril e US\$ 1,00 a cada 100m<sup>3</sup>, respectivamente. Os dados de produção e VPL podem ser vistos na Tabela 5.24.

Tabela 5.24: Dados de produção e VPL do Caso Base do Campo-3

| Dados de produção e VPL do Caso Base do Campo-3 |                  |
|---|------------------|
| Produção acumulada de óleo (m <sup>3</sup> )    | 26.202.530,00    |
| Produção acumulada de gás (Mm <sup>3</sup> )    | 3.314.621.000,00 |
| Produção acumulada de água (m <sup>3</sup> )    | 52.687.770,00    |
| Injeção acumulada de água (m <sup>3</sup> )     | 89.795.000,00    |
| Valor Presente Líquido (US\$)                   | 2.853.377.733,95 |

### 5.3.1 Teste-1

Após a validação íntegra do modelo com relação às restrições, é possível verificar o desempenho do algoritmo através do VPL e das curvas de produção obtidas através da simulação da alternativa. Sendo assim, o Teste-1 tem como principal objetivo comparar uma alternativa otimizada com o Caso Base descrito acima.

Para se otimizar a alternativa utilizou-se os mesmos parâmetros de restrição e de VPL do Caso Base e os parâmetros de evolução estão descritos na Tabela 5.25. A quantidade máxima de poços foi fixada em 8, a mesma quantidade de poços do Caso Base e a plataforma foi fixada no centro do reservatório com  $x = 354864$  e  $y = 7517149$ , sendo  $i = 42$  e  $j = 20$ , aproximadamente.

**Tabela 5.25: Parâmetros de evolução do Teste-1 do Campo-3**

| Parâmetros de evolução do Teste-1 do Campo-3 |      |
|--|------|
| Tamanho da população                         | 80   |
| Número de gerações                           | 50   |
| Taxa inicial de Steady State                 | 0,40 |
| Taxa final de Steady State                   | 0,20 |
| Taxa inicial de cruzamento                   | 0,65 |
| Taxa final de cruzamento                     | 0,08 |
| Taxa inicial de mutação                      | 0,08 |
| Taxa final de mutação                        | 0,30 |

A configuração de poços encontrada pelo algoritmo possui 5 poços produtores e 3 poços injetores, esta configuração pode ser vista na Figura 5.24 e com mais detalhes na Tabela 5.26. Os dados de produção e VPL podem ser vistos na Tabela 5.27. No gráfico da Figura 5.25 é possível visualizar as curvas de produção acumulada de óleo e água, onde a produção de óleo se mostrou superior a produção de água durante toda a concessão do campo.

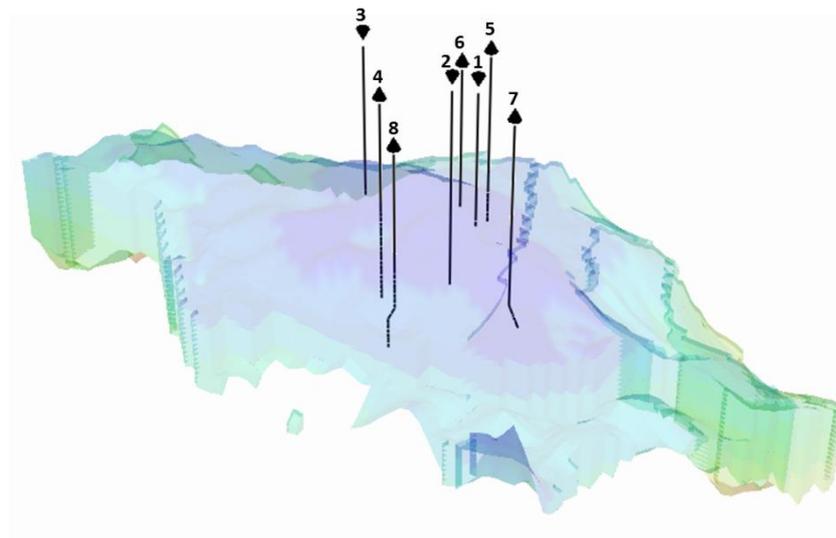


Figura 5.24: Configuração de poços do Teste-1 do Campo-3 vista em 3D

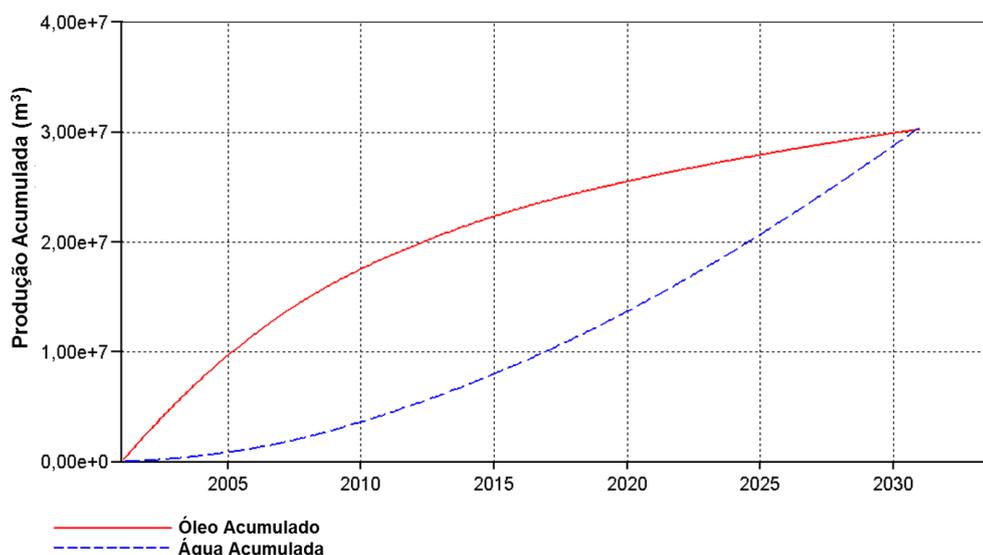
Tabela 5.26: Configuração de poços do Teste-1 do Campo-3

| Configuração de poços do Teste-1 do Campo-3 |          |       |       |       |       |       |       |
|---|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nome  | Tipo     | $I_i$ | $J_i$ | $K_i$ | $I_f$ | $J_f$ | $K_f$ |
| Poço 1                                      | Injetor  | 45    | 18    | 8     | 45    | 18    | 8     |
| Poço 2                                      | Injetor  | 43    | 19    | 22    | 43    | 19    | 22    |
| Poço 3                                      | Injetor  | 33    | 18    | 6     | 33    | 18    | 6     |
| Poço 4                                      | Produtor | 39    | 24    | 3     | 39    | 24    | 20    |
| Poço 5                                      | Produtor | 43    | 13    | 5     | 43    | 13    | 10    |
| Poço 6                                      | Produtor | 42    | 16    | 5     | 42    | 16    | 5     |
| Poço 7                                      | Produtor | 50    | 20    | 17    | 51    | 20    | 21    |
| Poço 8                                      | Produtor | 44    | 29    | 5     | 44    | 30    | 18    |

Tabela 5.27: Dados de produção e VPL do Teste-1 do Campo-3

| Dados de produção e VPL do Teste-1 do Campo-3 |                  |
|---|------------------|
| Produção acumulada de óleo ( $m^3$ )          | 30.258.930,00    |
| Produção acumulada de gás ( $Mm^3$ )          | 3.874.249.000,00 |
| Produção acumulada de água ( $m^3$ )          | 30.475.480,00    |
| Injeção acumulada de água ( $m^3$ )           | 66.618.000,00    |
| Valor Presente Líquido (US\$)                 | 2.853.337.733,95 |

**Produção de Óleo Acumulada x Produção de Água Acumulada**  
 Teste 1 do Campo 3



**Figura 5.25: Curvas de produção acumulada de óleo e água do Teste-1 do Campo-3**

Comparando os dados obtidos no Teste-1 com o Caso Base é possível verificar que o modelo otimizado apresentou um VPL 23% superior em relação ao Caso Base. Isto devido ao aumento na produção de óleo em 15% e uma redução na injeção de água em 26%. Estes dados podem ser visualizados na Tabela 5.28 e graficamente na Figura 5.26.

**Tabela 5.28: Dados comparativos do Teste-1 em relação ao Caso Base do Campo-3**

| Dados comparativos do Teste-1 em relação ao Caso Base do Campo-3 |                  |            |
|--|------------------|------------|
| Nome   | Valor            | Percentual |
| Produção de Óleo Caso Base (m³)                                  | 26.202.530,00    | 15%        |
| Produção de Óleo Teste-1 (m3)                                    | 30.258.930,00    |            |
| Injeção de água do Caso Base (m3)                                | 89.795.000,00    | -26%       |
| Injeção de água do Teste-1 (m3)                                  | 66.618.000,00    |            |
| VPL Caso Base (US\$)   | 2.314.198.166,01 | 23%        |
| VPL Teste-1 (US\$)   | 2.853.337.733,95 |            |

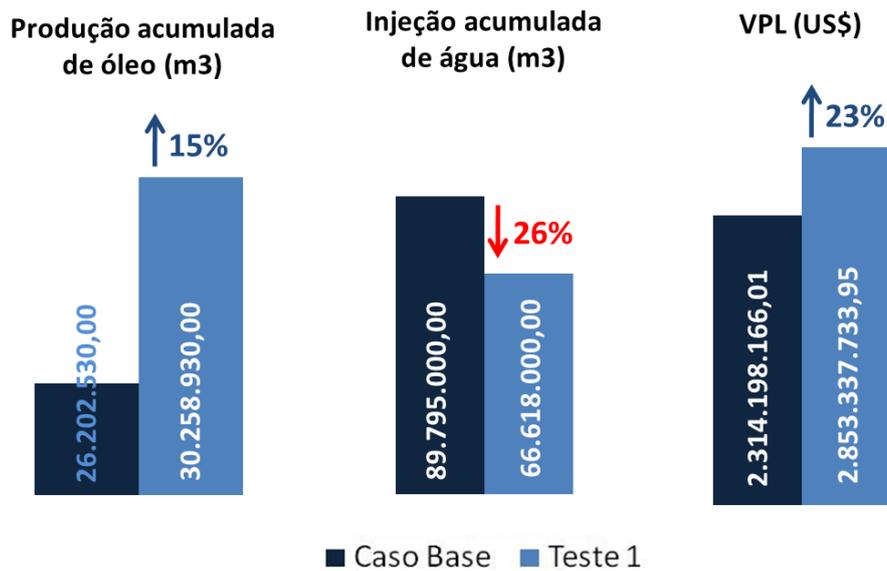


Figura 5.26: Dados comparativos do Teste-1 em relação ao Caso Base do Campo-3

### 5.3.2 Teste-2

O Teste-2 foi realizado otimizando a localização dos poços juntamente com a plataforma. Este teste utilizou uma única plataforma e um número máximo de 8 poços com o objetivo de compará-lo com o teste anterior e como Caso Base.

A alternativa otimizada encontrou 8 poços, sendo 5 produtores e 3 injetores e localizou a plataforma em  $i = 44$  e  $j = 25$ , esta configuração pode ser vista em 3D na Figura 5.27 e mais detalhadamente na Tabela 5.29.

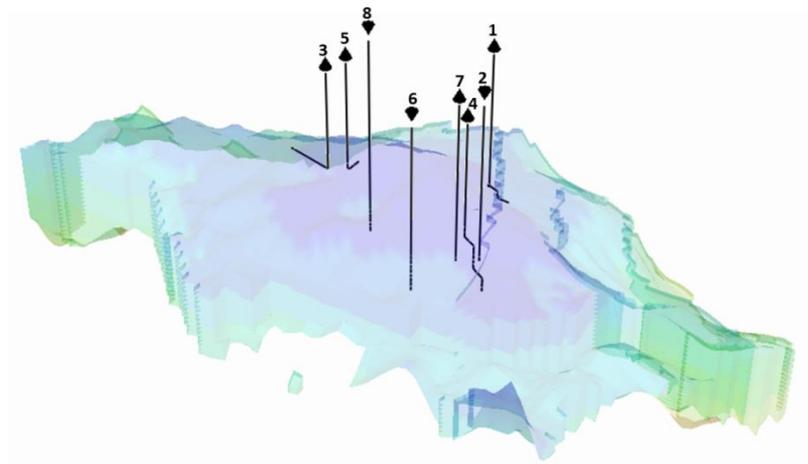


Figura 5.27: Configuração de poços do Teste-2 do Campo-3 vista em 3D

Tabela 5.29: Configuração de poços do Teste-2 do Campo-3

| Configuração de poços do Teste-2 do Campo-3 |          |                |                |                |                |                |                |
|---|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Nome  | Tipo     | I <sub>i</sub> | J <sub>i</sub> | K <sub>i</sub> | I <sub>f</sub> | J <sub>f</sub> | K <sub>f</sub> |
| Poço 1                                      | Produtor | 47             | 15             | 4              | 48             | 12             | 10             |
| Poço 2                                      | Injetor  | 50             | 21             | 15             | 50             | 21             | 15             |
| Poço 3                                      | Produtor | 35             | 24             | 1              | 25             | 15             | 3              |
| Poço 4                                      | Produtor | 50             | 24             | 6              | 52             | 24             | 17             |
| Poço 5                                      | Produtor | 37             | 22             | 3              | 36             | 22             | 5              |
| Poço 6                                      | Injetor  | 46             | 27             | 9              | 46             | 27             | 16             |
| Poço 7                                      | Produtor | 48             | 22             | 17             | 48             | 22             | 18             |
| Poço 8                                      | Injetor  | 37             | 19             | 12             | 36             | 18             | 22             |

Comparando o Teste-2 com o Teste-1, foi possível observar que o Teste-2 obteve um VPL 17% superior ao VPL do Teste-1. Além disso, a produção de óleo teve um aumento de 10% e a produção de água foi maior apenas 2%. Ao comparar o Teste-2 com o Caso Base, foi possível perceber um aumento ainda maior no VPL de 44%. Isto pode ser justificado pelo aumento da produção de óleo em 27% e uma redução na produção de água em 41%. Esses dados comparativos podem ser vistos graficamente na Figura 5.28 e com detalhes na Tabela 5.30.

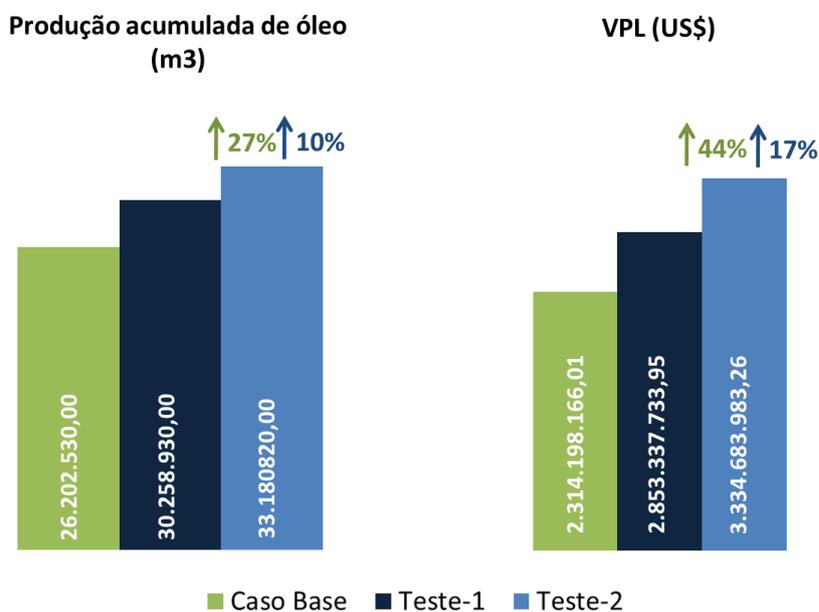


Figura 5.28: Gráfico comparativo do VPL e dados de produção e injeção do Teste-2 comparados com o Teste-1 e o Caso Base do Campo-3

Tabela 5.30: Dados comparativos do Teste-2 em relação ao Caso Base e ao Teste-1 do Campo-3

| Dados Comparativos do Teste-2 em relação ao Caso Base e ao Teste-1 do Campo-3 |                  |                  |            |                  |            |
|---|------------------|------------------|------------|------------------|------------|
| Nome  | Teste-2          | Caso Base        | Percentual | Teste-1          | Percentual |
| Produção acumulada de óleo (m <sup>3</sup> )                                  | 33.180.820,00    | 26.202.530,00    | 27%        | 30.258.930,00    | 10%        |
| Produção acumulada de gás (Mm <sup>3</sup> )                                  | 4.549.488.000,00 | 3.314.621.000,00 | 37%        | 3.874.249.000,00 | 17%        |
| Produção acumulada de água (m <sup>3</sup> )                                  | 30.939.970,00    | 52.687.770,00    | -41%       | 30.475.480,00    | 2%         |
| Injeção acumulada de água (m <sup>3</sup> )                                   | 69.804.000,00    | 89.795.000,00    | -22%       | 66.618.000,00    | 5%         |
| Valor Presente Líquido (US\$)   | 3.334.683.983,26 | 2.314.198.166,01 | 44%        | 2.853.337.733,95 | 17%        |

O modelo de solução permite avaliar as características do campo e alocar a plataforma e seus poços de forma a aumentar a produção e até mesmo reduzir os custos de desenvolvimento, fazendo com que o VPL do projeto seja maior. Sendo assim, podemos concluir que é mais vantajoso otimizar a localização dos poços juntamente com a localização da plataforma

### 5.3.3 Teste-3

O Teste-3 utilizou Caso Base como *semente inicial* a fim de testar a evolução do modelo a partir da alternativa de um especialista. Os parâmetros de restrição e de VPL foram os mesmos utilizados no Caso Base e os parâmetros de evolução podem ser visto na Tabela 5.31. A configuração de poços do Teste-3 encontrou 5 poços produtores e 3 poços injetores com a plataforma localizada em  $i = 46$  e  $j = 15$ , aproximadamente, conforme Figura 5.29 e Tabela 5.32. A produção de óleo se manteve superior a produção de água até o fim da concessão do campo, de acordo com o gráfico da Figura 5.30.

Tabela 5.31: Parâmetros de evolução do Teste-3 do Campo-3

| Parâmetros de evolução do Teste-3 do Campo-3 |      |
|--|------|
| Tamanho da população                         | 100  |
| Número de gerações                           | 80   |
| Taxa inicial de Steady State                 | 0,40 |
| Taxa final de Steady State                   | 0,20 |
| Taxa inicial de cruzamento                   | 0,65 |
| Taxa final de cruzamento                     | 0,08 |
| Taxa inicial de mutação                      | 0,08 |
| Taxa final de mutação                        | 0,30 |

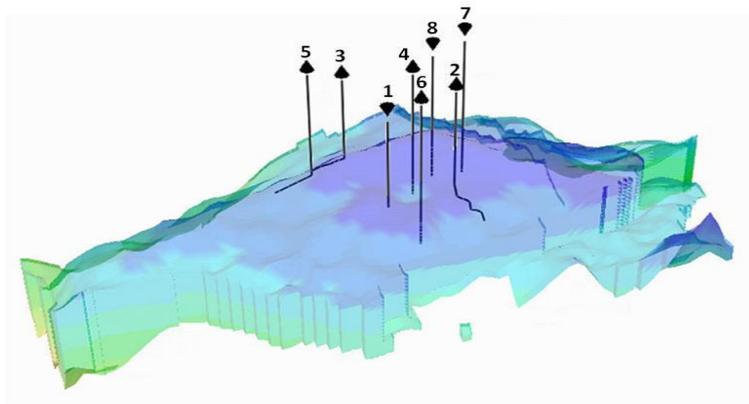


Figura 5.29: Configuração de poços do Teste-3 do Campo-3 vista em 3D

Tabela 5.32: Configuração de poços do Teste-3 do Campo-3

| Configuração de poços do Teste-3 do Campo-3 |          |       |       |       |       |       |       |
|---|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nome  | Tipo     | $I_i$ | $J_i$ | $K_i$ | $I_f$ | $J_f$ | $K_f$ |
| Poço 1                                      | Injetor  | 38    | 28    | 3     | 38    | 28    | 3     |
| Poço 2                                      | Produtor | 46    | 25    | 10    | 48    | 28    | 11    |
| Poço 3                                      | Produtor | 36    | 19    | 1     | 33    | 19    | 1     |
| Poço 4                                      | Produtor | 43    | 20    | 13    | 43    | 20    | 17    |
| Poço 5                                      | Produtor | 33    | 17    | 2     | 29    | 17    | 3     |
| Poço 6                                      | Produtor | 42    | 26    | 12    | 42    | 26    | 18    |
| Poço 7                                      | Injetor  | 50    | 15    | 10    | 50    | 15    | 15    |
| Poço 8                                      | Injetor  | 46    | 17    | 6     | 46    | 17    | 13    |

Produção de Óleo Acumulada x Produção de Água Acumulada  
Teste 3 do Campo 3

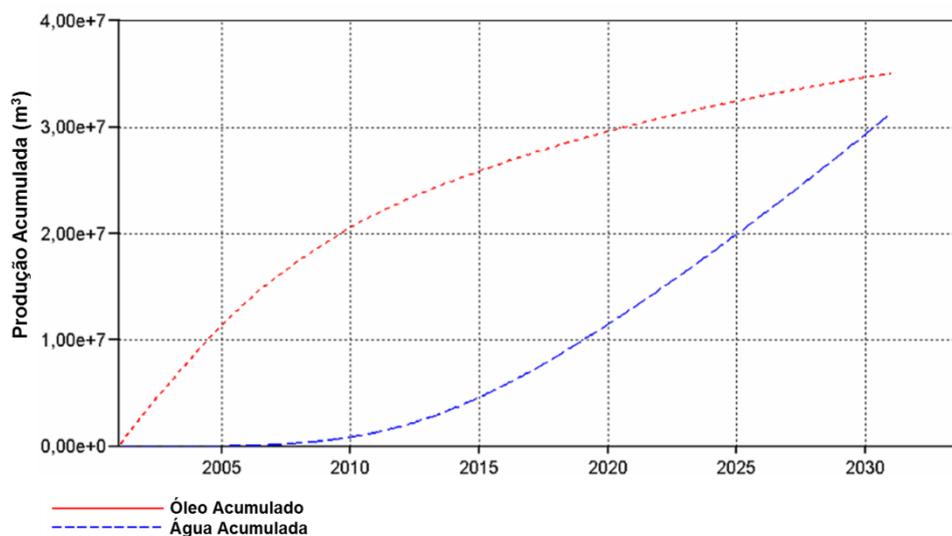


Figura 5.30: Curvas de produção acumulada de óleo e água do Teste-3 do Campo-3

Comparando os resultados obtidos com o Caso Base, percebeu-se um aumento de 51% no VPL do projeto e um aumento de 34% na produção acumulada de óleo. Ao compará-lo com o Teste-2 esse aumento foi de 5% em relação ao VPL e 6% em relação à produção acumulada de óleo. Estes dados podem ser vistos na Figura 5.31 e analisados com mais detalhes na Tabela 5.33.

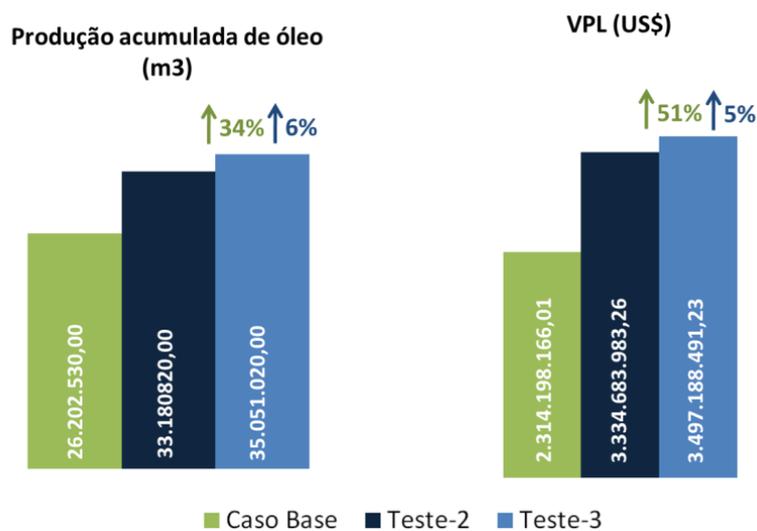


Figura 5.31: Dados comparativos de VPL e produção acumulada de óleo do Teste-3 em relação ao Caso Base e ao Teste-2 do Campo-3

Tabela 5.33: Dados comparativos do Teste-3 em relação ao Caso Base e ao Teste-2 do Campo-3

| Dados Comparativos do Teste-3 em relação ao Caso Base e ao Teste-2 do Campo-3 |                  |                  |            |                  |            |
|---|------------------|------------------|------------|------------------|------------|
| Nome  | Teste-3          | Caso Base        | Percentual | Teste-2          | Percentual |
| Produção acumulada de óleo (m³)   | 35.051.020,00    | 26.202.530,00    | 34%        | 33.180.820,00    | 6%         |
| Produção acumulada de gás (Mm³)   | 4.341.342.000,00 | 3.314.621.000,00 | 31%        | 4.549.488.000,00 | -5%        |
| Produção acumulada de água (m³)   | 31.277.680,00    | 52.687.770,00    | -41%       | 30.939.970,00    | 1%         |
| Injeção acumulada de água (m³)  | 74.028.000,00    | 89.795.000,00    | -18%       | 69.804.000,00    | 6%         |
| Valor Presente Líquido (US\$)   | 3.497.188.491,23 | 2.314.198.166,01 | 51%        | 3.334.683.983,26 | 5%         |

### 5.3.4 Teste-4

Considerando a aleatoriedade do modelo de solução realizou-se uma análise estatística a fim de validar este modelo quanto à sua robustez nos resultados obtidos. Desta maneira, foram realizados 5 experimentos e a partir daí foi calculado o coeficiente de variação (CV) dos resultados em relação a média.

Os experimentos foram otimizados com os mesmos parâmetros de restrição e VPL do Caso Base e os mesmos parâmetros de evolução do Teste-3, fixando o número máximo de poços em até 8, para fins comparativos. A partir dos dados de produção e injeção obtidos em cada um dos experimentos, bem como o VPL, foi calculado a média, o desvio-padrão e o coeficiente de variação. Estes valores podem ser vistos na Tabela 5.34.

Foi possível perceber, que os valores de produção e injeção apresentaram coeficiente de variação de até 12,18% e o VPL se mostrou ainda menos variável com coeficiente de variação igual a 3,55%, ou seja, os dados estão variando próximo ao valor médio, o que caracteriza uma robustez nos resultados.

Através do Intervalo de Confiança foi possível verificar que, com uma significância de 5%, o VPL e as produções acumuladas de óleo e gás foram substancialmente superiores aos dados encontrados pelo Caso Base. No caso da produção e injeção acumulada de água, os resultados obtidos não foram significativamente diferentes dos auferidos pelo Caso Base. Os intervalos de confiança (IC) encontrado para o VPL e para os demais dados se encontram na Tabela 5.34.

**Tabela 5.34: Dados de produção e VPL do Caso Base e dos experimentos realizados no Teste-4 do Campo-3 e seus respectivos dados estatísticos**

|                      | Produção acumulada de óleo (m <sup>3</sup> ) | Produção acumulada de gás (Mm <sup>3</sup> ) | Produção acumulada de água (m <sup>3</sup> ) | Injeção acumulada de água (m <sup>3</sup> ) | Valor Presente Líquido (US\$) |
|----------------------|--|--|--|---|-------------------------------|
| <b>Caso Base</b>     | 26.202.530,00                                | 3.314.621.000,00                             | 52.687.770,00                                | 89.795.000,00                               | 2.314.198.166,01              |
| <b>Experimento 1</b> | 33.912.060,00                                | 4.289.878.000,00                             | 60.619.750,00                                | 108.103.000,00                              | 3.380.905.951,48              |
| <b>Experimento 2</b> | 29.929.870,00                                | 3.738.208.000,00                             | 46.075.640,00                                | 82.882.000,00                               | 3.149.891.719,76              |
| <b>Experimento 3</b> | 31.951.210,00                                | 3.895.732.000,00                             | 44.130.720,00                                | 82.184.000,00                               | 3.234.560.969,68              |
| <b>Experimento 4</b> | 32.640.370,00                                | 3.938.347.000,00                             | 46.786.680,00                                | 88.715.000,00                               | 3.221.231.752,51              |
| <b>Experimento 5</b> | 33.473.390,00                                | 4.076.745.000,00                             | 53.900.560,00                                | 96.426.000,00                               | 3.470.904.041,51              |
| <b>Média</b>         | 32.381.380,00                                | 3.987.782.000,00                             | 50.302.670,00                                | 91.662.000,00                               | 3.291.498.886,99              |
| <b>Desvio-padrão</b> | 1.399.820,73                                 | 185.677.468,63                               | 6.127.150,84                                 | 9.680.990,34                                | 116.971.636,80                |
| <b>IC Inferior</b>   | 31.047.959,82                                | 3.810.912.149,81                             | 44.466.160,81                                | 82.440.227,84                               | 3.180.075.804,65              |
| <b>IC Superior</b>   | 33.714.800,18                                | 4.164.651.850,19                             | 56.139.179,19                                | 100.883.772,16                              | 3.402.921.969,33              |
| <b>CV (%)</b>        | 4,32   | 4,66   | 12,18  | 10,56                                       | 3,55                          |

Através da função de avaliação foi possível obter, para cada um dos experimentos realizados, o VPL pontual durante toda a concessão do campo. Os pontos observados representam o último dia de cada mês, com o primeiro VPL em 31 de janeiro de 2001, o segundo em 28 de fevereiro de 2001 e assim sucessivamente até 31 de dezembro de 2032, totalizando 384 observações. O gráfico da Figura 5.32 mostra as curvas de VPL do Caso Base e dos experimentos realizados, bem como o VPL médio dos experimentos ao longo da concessão do campo.

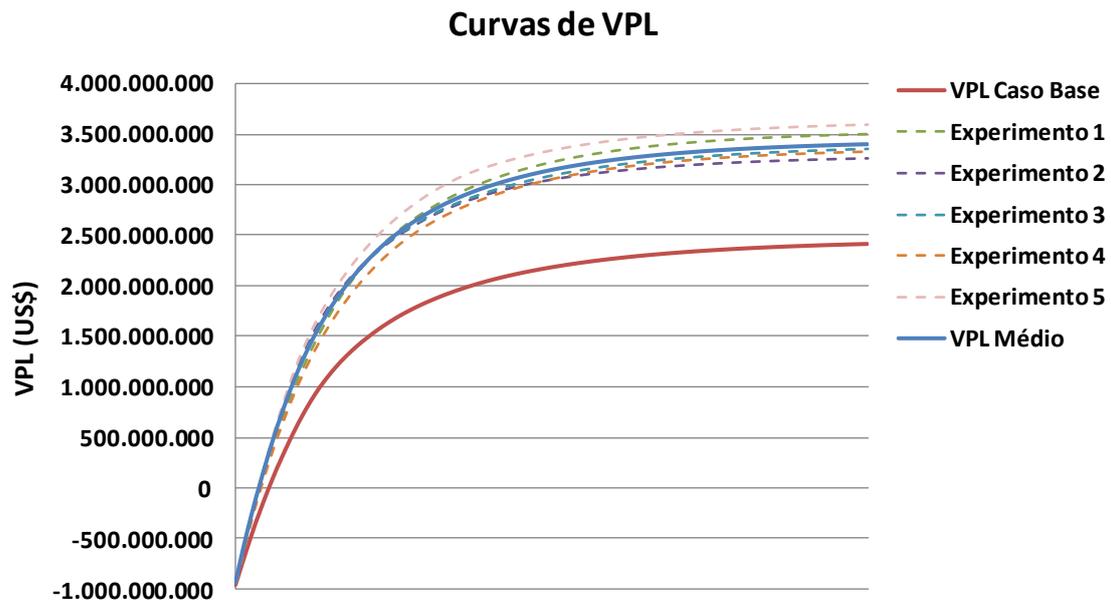


Figura 5.32: Curva de VPL do Caso Base e curvas de VPL médio em relação as curvas dos experimentos realizados no Teste-4 do Campo-3

De acordo com o gráfico da Figura 5.33, foi possível verificar que, estatisticamente, a curva de VPL médio encontrado pelo modelo, foi significativamente superior a curva de VPL do Caso Base, com 95% de confiança. Desta forma, o modelo de solução se mostrou robusto e capaz de encontrar alternativas satisfatórias respeitando as restrições impostas pelo problema. As conclusões destas análises serão descritas no próximo capítulo.

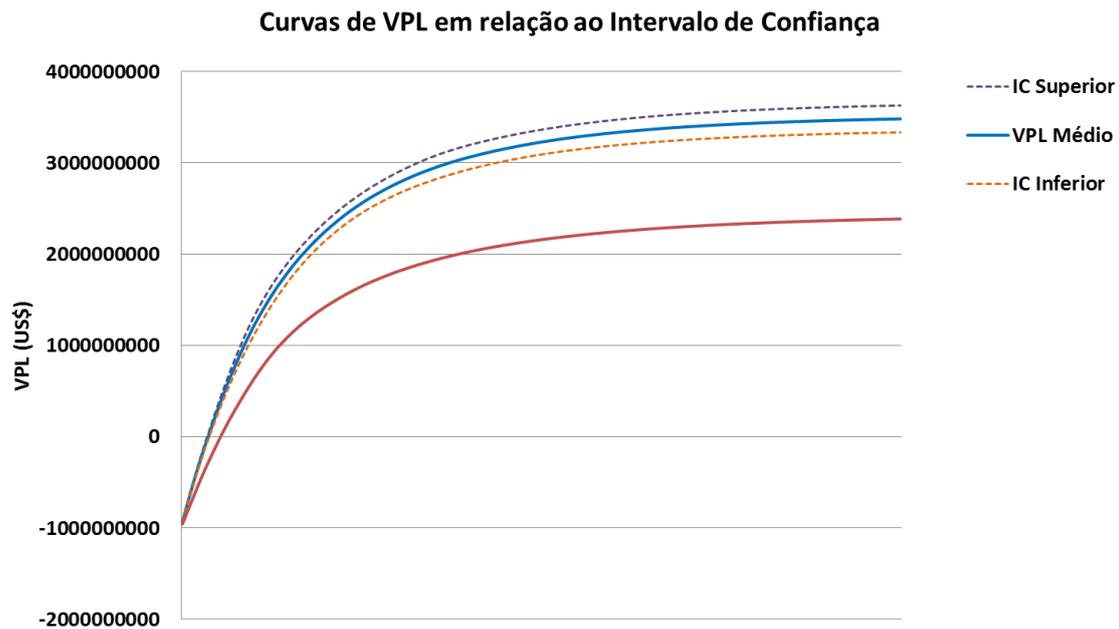


Figura 5.33: Curva de VPL do Caso Base e curvas de VPL médio dos experimentos realizados no Teste-4 do Campo-3 em relação as curvas do Intervalo de Confiança