# 5
# Estudo de Caso

Nesse capítulo, serão apresentados os testes realizados com o Sistema Híbrido de Otimização de Estratégia de Controle de Válvulas de Poços Inteligentes sob Incertezas, descrito no capítulo 4. Os testes foram realizados utilizando três configurações de reservatório diferentes, onde um reservatório é sintético e os outros dois possuem características reais. Os seguintes testes foram realizados: testes com o modelo de otimização sem incertezas utilizando válvulas on/off e válvulas de abertura contínua; teste considerando incertezas de falhas nas válvulas sem substituição da válvula após a ocorrência de uma falha; teste considerando incertezas de falhas e a substituição da válvula após a ocorrência de uma falha e testes considerando incerteza geológica.

## 5.1
## Definição dos Reservatórios

Serão descritas a seguir as configurações de reservatórios utilizadas nos testes. Os nomes dados aos reservatórios foram escolhidos de forma a ressaltar uma característica importante do mesmo.

### 5.1.1
### Reservatório Sintético

Este modelo de reservatório consiste em uma malha de 40 x 11 x 3 blocos, nas direções i,j,k; cujas dimensões são de aproximadamente 50,0 x 50,0 x 10,0 metros.

Os valores geológicos do reservatório são os seguintes:

- permeabilidade 500,0 (mD) nas direções i, j primeira camada;
  800,0 (mD) nas direções i, j segunda camada;
  1200,0 (mD) nas direções i, j terceira camada;
  50,0 (mD) na direção k da primeira camada;
  70,0 (mD) na direção k da segunda camada;
  120,0 (mD) na direção k da terceira camada;
- porosidade 0,20;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

A característica principal deste modelo é a existência de três camadas com permeabilidades diferentes que são isoladas por barreiras de folhelhos, representadas por transmissibilidade igual a zero. Na figura 16 mostra-se a visão 3D deste campo.

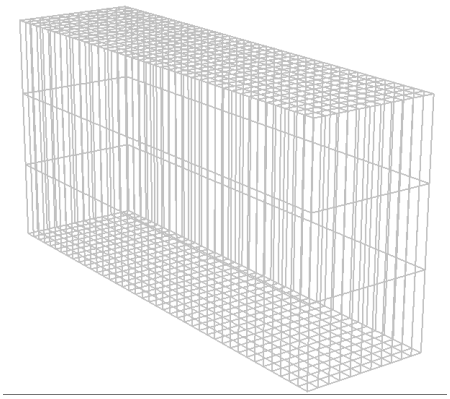

Figura 16. Modelo do reservatório sintético

### 5.1.2
### Reservatório Real

Este modelo de reservatório consiste em uma malha do tipo *corner point* de 43x55x6 blocos, nas direções i,j,k; cujas dimensões são de aproximadamente 100,0 x 100,0 x 10 metros.

Os valores geológicos do reservatório são os seguintes:

- permeabilidade variável (mapa de permeabilidade), dividindo o campo em três regiões;
  Camadas 1 a 3 formam uma região;
  Camadas 4 e 5 formam outra região;
  Camada 6 forma a última região;
- porosidade mapa de porosidade, respeitando as regiões descritas acima;

Este é um modelo com características reais, que possui sua porosidade e permeabilidade descritas através de mapas que dividem o campo em três regiões. Na figura 17 mostra-se a visão 3D deste campo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

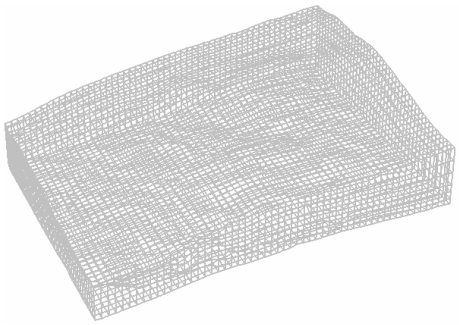

Figura 17. Modelo do reservatório real

### 5.1.3
### Reservatório com Aqüífero

Este modelo de reservatório consiste também em uma malha do tipo *corner point* de 33x57x3 blocos, nas direções i,j,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, j;
  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 funda, formando um aqüífero. As demais regiões possuem saturação de água no valor de 0,25. Este fato cria a condição de heterogeneidade da reserva. Na figura 18 mostra-se a visão 3D deste campo.

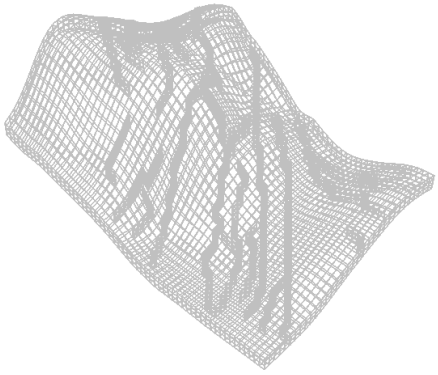

Figura 18. Modelo do reservatório com aqüífero

A próxima seção descreve os testes realizados com o algoritmo de otimização de controle de válvulas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

## 5.2
## Otimização de Controle de Válvulas em Poços Inteligentes

Nesse estudo de caso avalia-se os resultados obtidos com o modelo proposto para otimização de controle de válvulas de poços inteligentes sem considerar incertezas.

A próxima seção mostra como foi realizada a representação das válvulas no simulador de reservatório.

### 5.2.1
### Representação das Válvulas no IMEX

Conforme visto na seção 4.1.1, foram implementadas duas representações de válvulas: válvulas on/off e válvulas com abertura contínua.

As válvulas on/off foram representadas pelo uso das palavras chaves “OPEN” e “CLOSED“ existentes no cartão *PERF usado para descrever um poço no IMEX. Assim, simula-se a abertura e o fechamento de completações do poço no decorrer do processo de explotação. A figura 19, a seguir, exemplifica a descrição de um poço injetor com válvula on/off.

```
*WELL 1 'INJ1'     *declaração do nome do poço 1*
*INCOMP *WATER
*OPERATE *MAX *STW 400 *declaração do valor máximo de STW*
*OPERATE *MAX *BHP 400 *declaração do valor máximo de BHP*
*GEOMETRY *K 0.100 0.37 1.0 0 *declaração de valores da geometria do poço*
*PERF *GEO 'INJ1' *declaração dos grids onde o poço é perfurado*
   1 6 1 1.0 *OPEN FLOW-FROM 'SURFACE'
   1 6 2 1.0 *OPEN FLOW-FROM 1
   1 6 3 1.0 *OPEN FLOW-FROM 2
```

Figura 19. Exemplo de representação de válvula on/off no IMEX

Conforme descrito no capítulo 4, seção 4.1.1, as válvulas com abertura contínua foram representadas de duas formas:

- pela alteração do valor do operador de vazão de injeção de água (*STW);
- pela alteração do fator de correção do índice de produtividade ou injetividade, nas completações afetadas pelas válvulas (*FF).

Para realizar a representação pela alteração do valor de *STW, cada completação do poço é descrita como um poço, usando o cartão *PERF, e depois relacionada a um grupo pelo cartão *ATTACHTO.

A figura 20, a seguir, exemplifica a descrição de um poço injetor com válvula de abertura contínua representada pela alteração do operador de vazão de injeção de água (*STW).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

```
*GROUP 'INJECTOR1' *ATTACHTO 'INJETORES' *declaração do grupo de injetores*
*GROUP 'INJETORES' *ATTACHTO 'FIELD'
*WELL 1 'INJ1' *ATTACHTO 'INJETOR1'
*INJECTOR MOBWEIGHT 'INJ1'
*INCOMP *WATER
*OPERATE *MAX *STW 150 *declaração do valor máximo de STW*
*OPERATE *MAX *BHP 400 *declaração do valor máximo de BHP*
*GEOMETRY *K 0.100 0.37 1.0 0 *declaração de valores da geometria do poço*
*PERF *GEO 'INJ1' *cartão que define os grids por onde passa o poço*
    1     6    1    1.0 *declaração do grid onde a completação é perfurada*
*WELL 2 'INJ2' *ATTACHTO 'INJETOR1'
*INJECTOR MOBWEIGHT 'INJ2'
*INCOMP *WATER
*OPERATE *MAX *STW 150 *declaração do valor máximo de STW*
*OPERATE *MAX *BHP 400 *declaração do valor máximo de BHP*
*GEOMETRY *K 0.100 0.37 1.0 0 *declaração de valores da geometria do poço*
*PERF *GEO 'INJ2' *cartão que define os grids por onde passa o poço*
    1     6    2    1.0 *declaração do grid onde a completação é perfurada*
*WELL 3 'INJ3' *ATTACHTO 'INJETOR1'
*INJECTOR MOBWEIGHT 'INJ3'
*INCOMP *WATER
*OPERATE *MAX *STW 150 *declaração do valor máximo de STW*
*OPERATE *MAX *BHP 400 *declaração do valor máximo de BHP*
*GEOMETRY *K 0.100 0.37 1.0 0 *declaração de valores da geometria do poço*
*PERF *GEO 'INJ3' *cartão que define os grids por onde passa o poço*
    1  6   3   1.0 *declaração do grid onde a completação é perfurada*
```

Figura 20. Exemplo de representação de válvula de abertura contínua no IMEX através da alteração do operador *STW.

A figura 21, a seguir, exemplifica a descrição de um poço injetor com válvula de abertura contínua representada pela alteração do índice de injetividade (FF).

```
*WELL 1 'INJ1'
*INCOMP *WATER
*OPERATE *MAX *STW 400 *declaração do valor máximo de STW*
*OPERATE *MAX *BHP 400 *declaração do valor máximo de BHP*
*GEOMETRY *K 0.100 0.37 1.0 0 *declaração de valores da geometria do poço*
*PERF *GEO 'INJ1' *declaração dos grids onde o poço é perfurado*
    1 6 1 1.0 *OPEN FLOW-FROM 'SURFACE'
    1 6 2 1.0 *OPEN FLOW-FROM 1
    1 6 3 1.0 *OPEN FLOW-FROM 2
```

Figura 21. Exemplo de representação de válvula de abertura contínua no IMEX através da alteração do índice de injetividade (FF).

### 5.2.2
### Função de Avaliação

Conforme descrito no capítulo 4, a avaliação ocorre da seguinte forma:

1. A configuração das válvulas, para cada intervalo de tempo pré determinado, representada por um cromossomo, é inserida no simulador;
2. O simulador fornece o perfil de produção para esta configuração;
3. A partir do perfil obtido, calcula-se o Valor Presente Líquido do Reservatório;

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

O cálculo do VPL é feito conforme descrito na seção 4.2.1, sendo que na equação 6, que descreve o cálculo do custo operacional, o valor do custo da válvula não é considerado, já que as válvulas não sofrem substituição, pois incertezas técnicas não são consideradas nos testes dessa seção.

A tabela 1 abaixo mostra os valores dos parâmetros utilizados no cálculo do VPL.

| Parâmetro | Valor |
|---|---|
| Preço do petróleo (US$/bbl) | 20,00 |
| Taxa de desconto | 0,10 |
| Custo de produção de água (US$/m3) | 3,00 |
| Packer (por válvula) | 80.000,00 |
| Flat - pack (por poço inteligente) | 45,00/m de cabo |
| Custo Válvula Multiposição | 100.000,00 |
| Custo Válvula On/Off | 60.000,00 |
| HPU (por reservatório) | 200.00,00 |

Tabela 1. Valores dos Parâmetros do VPL

### 5.2.3
### Apresentação dos Resultados

A seguir, serão apresentados os resultados dos testes realizados com o algoritmo de Otimização de Controle de Válvulas em Poços Inteligentes, nos respectivos reservatórios.

Para todos os testes realizados nessa seção, o período de realização de controle nas válvulas foi de 2 anos para um período total de simulação de 20 anos, sendo ano inicial de simulação 2002 e o ano final 2022. Sendo assim, existem dez intervalos de tempo onde as válvulas podem ou não sofrer alteração no seu estado. O período de controle de válvulas de dois anos foi indicado por um especialista devido à disponibilidade dos equipamentos de troca e de manutenção das válvulas. Esses testes foram rodados em uma máquina AMD ATHLON XP 3500. O tempo de simulação em cada reservatório é mostrado na tabela 2 abaixo:

| Reservatório | Tempo |
|---|---|
| Reservatório Sintético | 2 segundos |
| Reservatório Real | 76 segundos |
| Reservatório com Aqüífero | 12 segundos |

Tabela 2. Tempo de simulação em cada Reservatório

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

## Reservatório Sintético

A alternativa de poços utilizada nos testes realizados nesse reservatório é composta de: um poço vertical injetor (1,6,3) e um poço vertical produtor (40,6,3) (a descrição dos poços encontra-se no Apêndice B). O número de válvulas existentes nessa alternativa é igual a três (considerando uma válvula em cada camada completada do poço injetor). A figura 22 mostra a alternativa descrita.

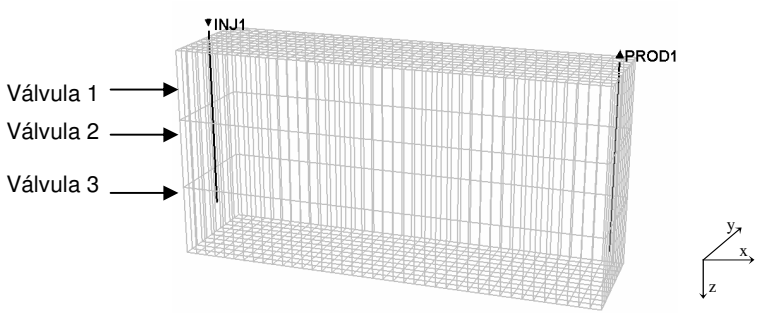


Figura 22. Alternativa utilizada nos testes do reservatório sintético.

Por ser um reservatório sintético, onde seu comportamento é esperado, os testes realizados com esse reservatório têm como objetivo avaliar os resultados do modelo de otimização desenvolvido e as representações das válvulas. Testes com todas as representações de válvulas foram realizados visando comparar os resultados, e com isso avaliar a melhor forma de se representar válvulas no IMEX.

A tabela 3 abaixo mostra as principais características que diferem os testes realizados nesse reservatório.

| Testes | Tipo de Válvula | Semente Inicial |
|---|---|---|
| Teste 1 | on/off | não |
| Teste 2 | on/off | Melhor indivíduo do teste 1 |
| Teste 3 | Abertura Contínua (STW) | não |
| Teste 4 | Abertura Contínua (STW) | Melhor indivíduo do teste 3 |
| Teste 5 | Abertura Contínua (FF) | não |
| Teste 6 | Abertura Contínua (FF) | Melhor indivíduo do teste 5 |

Tabela 3. Principais características dos testes do reservatório sintético.

A próxima tabela mostra os parâmetros do algoritmo genético utilizados nos seis testes realizados nesse reservatório. Conforme a descrição desses parâmetros feita no capítulo 3 dessa tese, esses valores são calibrados de forma empírica, tendo como base a complexidade do problema que esta sendo representado pelo AG. Testes com um número menor de gerações e indivíduos foram realizados, porém não demosntraram convergência. As taxas de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

cruzamento e mutação utilizadas nos testes são adaptativas, conforme explicado na seção 3.1.5 dessa tese. Sendo assim, declaram-se as taxas iniciais desses operadores e, a partir do inicio da evolução, elas vão sendo alteradas linearmente conforme o passar das gerações.

| **Parâmetros do AG** | **Teste 1** | **Teste 2** | **Teste 3** | **Teste 4** | **Teste 5** | **Teste 6** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Número de gerações | 150 | 100 | 150 | 100 | 150 | 100 |
| Número de indivíduos | 75 | 60 | 75 | 60 | 75 | 60 |
| Número de genes | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Número de rodadas | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| *Steady-State* | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| Taxa de *crossover* inicial | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.65 |
| Taxa de mutação inicial | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| Total de Simulações | 11.250 | 6.000 | 11.250 | 6.000 | 11.250 | 6.000 |
| Tempo de processamento | 7 horas | 4 horas | 7 horas | 4 horas | 7 horas | 4 horas |

Tabela 4. Parâmetros do AG

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

## Teste 1

Conforme tabela 3 acima, esse teste foi realizado considerando as válvulas como sendo do tipo on/off.

A tabela 5 mostra os resultados alcançados para o caso base e o caso controlado, onde o caso base representa a alternativa composta por poços convencionais, e o caso controlado representa a alternativa composta por um poço inteligente com a operação das válvulas otimizada pelo sistema de otimização de controle de válvulas.

| Caso | Base | Controlado | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 128.411.174,47 | 133.525.683,75 | 3,98% |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 2.025.550,00 | 2.130.100,00 | 5,16% |
| Água Acumulada ($m^3$) | 740.325,00 | 622.055,00 | -15,97% |

Tabela 5. Resultados Teste 1 (reservatório sintético – válvulas on/off)

A tabela 5 mostra que o caso controlado conseguiu obter um aumento do óleo acumulado, uma diminuição da água acumulada e, conseqüentemente, um aumento do VPL.

A tabela 6, a seguir, mostra a melhor configuração de válvulas encontrada. Analisando esse tabela, percebe-se que a válvula 1 do poço inteligente encontra-se aberta durante os 20 anos de exploração. Já as válvulas 2 e 3 são operadas sendo a válvula 3 mantida mais tempo fechada que a válvula 2. Esse resultado

era esperado, pois a válvula 1 encontra-se na camada de mais baixa permeabilidade.

| ***Tempo (Anos)*** | ***Válvula1 (Injetor)*** | ***Válvula2 (Injetor)*** | ***Válvula3 (Injetor)*** |
|---|---|---|---|
| 0-2 | Aberta | Aberta | Fechada |
| 2-4 | Aberta | Fechada | Aberta |
| 4-6 | Aberta | Aberta | Fechada |
| 6-8 | Aberta | Fechada | Aberta |
| 8-10 | Aberta | Aberta | Fechada |
| 10-12 | Aberta | Aberta | Aberta |
| 12-14 | Aberta | Fechada | Aberta |
| 14-16 | Aberta | Aberta | Fechada |
| 16-18 | Aberta | Aberta | Aberta |
| 18-20 | Aberta | Aberta | Aberta |

Tabela 6. Melhor Configuração de Válvulas (Teste 1)

A figura 23 mostra as curvas de avaliação do desempenho do AG. Analisando a curva *Score*, melhor indivíduo encontrado em cada geração do algoritmo genético, percebe-se que a partir da geração 50 o algoritmo genético converge, não encontrando indivíduos melhores do que o encontrado até esse ponto. Também a partir da geração 50, a curva Online demonstra que a população começa a ficar mais uniforme.

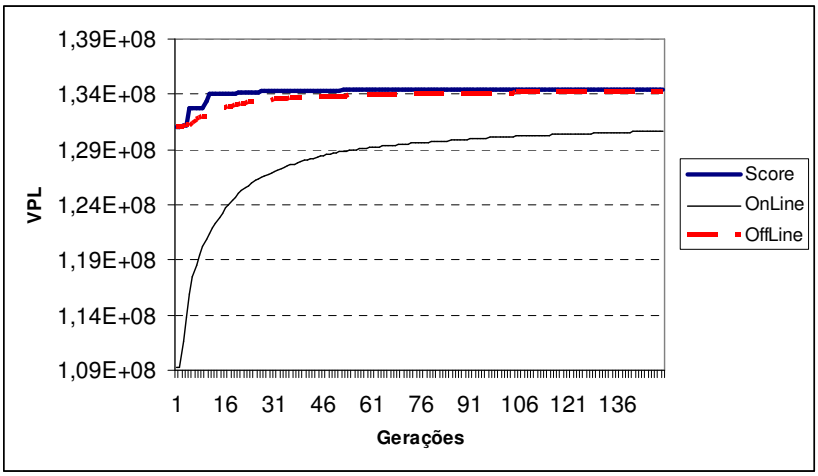


Figura 23. Curvas Algoritmo Genético Teste 1

A figura 24 mostra as curvas de óleo acumulado e água acumulada, tanto para o caso base como para o caso controlado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

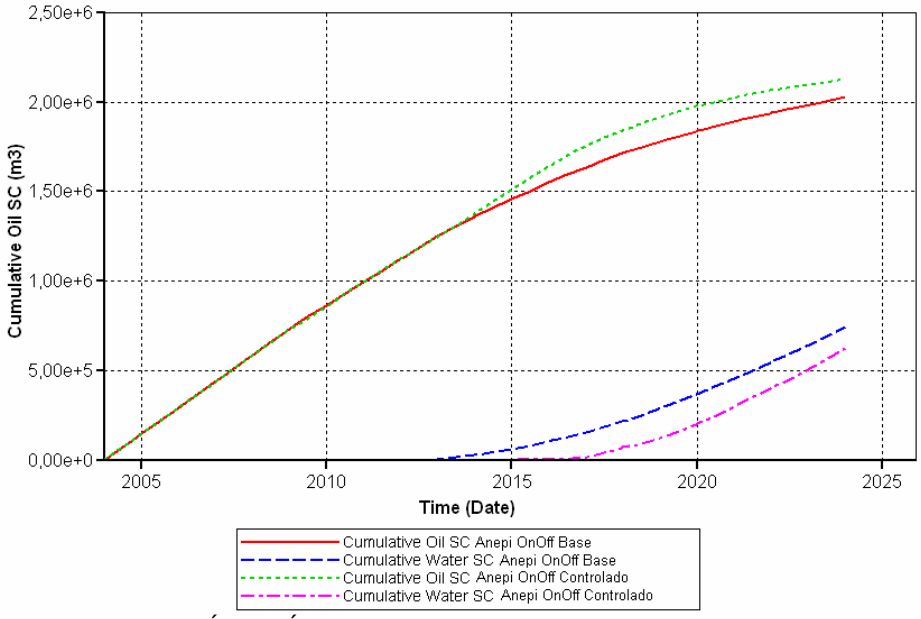


Figura 24. Curva de Óleo e Água Acumulado Caso Base x Caso Controlado Teste 1

Analisando-se as curvas de óleo acumulado para o caso base e para o caso controlado no teste 1 percebe-se que, a partir do ano 2014, o caso controlado começa a produzir mais óleo que o caso base, chegando a um acúmulo maior de óleo. Através das curvas de água acumulada pode-se perceber um atraso de mais ou menos quatro anos da chegada da frente de água do caso controlado com relação ao caso base.

As figuras 25 e 26 mostram a condição do campo, com relação ao avanço da frente de água, após 20 anos de simulação, para o caso base e o caso controlado respectivamente.

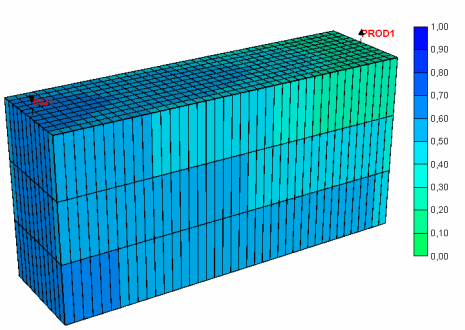


Figura 25. Condição do Campo Caso base – Teste 1

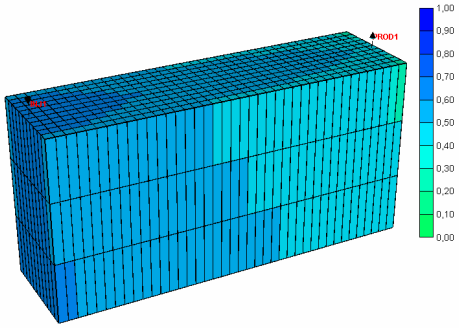


Figura 26. Condição do Campo Caso Controlado – Teste 1

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

A figura 26 mostra que o caso controlado consegue um avanço de água mais uniforme, permitindo uma maior recuperação de óleo e uma menor recuperação de água. Já no caso base, percebe-se o avanço da frente de água de forma bem mais avançada na terceira camada do campo, dificultando a continuidade da retirada de óleo ainda existente no reservatório.

## Teste 2

Conforme tabela 3, as válvulas utilizadas nesse teste também são do tipo on/off. Foi usada como semente inicial na inicialização da população do AG o melhor indivíduo encontrado no teste 1.

Através da curva *Score* e *Offline* (que estão sobrepostas) da figura 27 percebe-se que o AG não consegue encontrar uma solução melhor do que a encontrada no teste 1, sugerindo a convergência do algoritmo. Deste modo, o resultado do teste 2 é o mesmo analisado no teste 1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

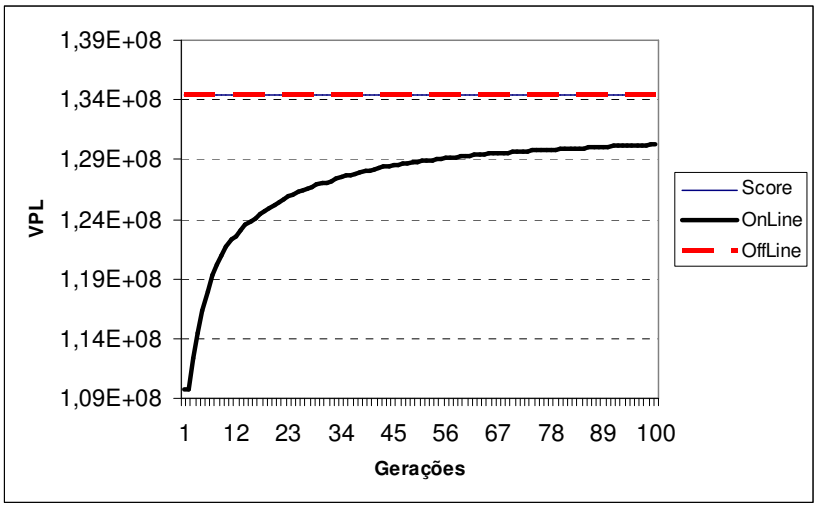


Figura 27. Curvas Algoritmo Genético Teste 2

## Teste 3

Conforme tabela 3, esse teste foi realizado considerando as válvulas como sendo do tipo abertura contínua e variando a vazão de injeção de água (*STW) do poço injetor.

A tabela 7, a seguir, mostra os resultados alcançados para o caso base e o caso controlado. Vale ressaltar que o VPL do caso base, para representação de válvula utilizada nesse teste, é diferente dos casos bases de válvulas on/off e válvulas de abertura contínua representada por FF. Isso ocorre porque a forma

de escrita da alternativa do caso base fica diferente, conforme apresentado nas figuras 19, 20 e 21.

| Caso | Base | Controlado | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 127.124.411,35 | 126.521.974,10 | -0,47 |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 2.019.640,00 | 2.054.200,00 | 1,7 |
| Água Acumulada ($m^3$) | 746.685,00 | 244.955,00 | -67,2 |

Tabela 7. Resultados Teste 3 (reservatório sintético – válvulas abertura contínua - STW)

Apesar de o caso controlado ter alcançado um aumento do óleo acumulado e uma diminuição na água acumulada, seu VPL foi um pouco inferior ao caso base, isso ocorre devido ao investimento das válvulas do poço inteligente e, conforme figura 29, tem-se que o caso controlado produz menos óleo acumulado que o caso base por aproximadamente oito anos, em tempos iniciais de produção, prejudicando assim o VPL.

A tabela 8 a seguir mostra a melhor configuração de válvulas encontrada no teste 3, apresentando os valores de STW de cada válvula, em cada intervalo de tempo.

| ***Tempo (Anos)*** | ***Válvula 1 (Injetor)*** | ***Válvula 2 (Injetor)*** | ***Válvula 3 (Injetor)*** |
|---|---|---|---|
| 0-2 | 146 | 112 | 148 |
| 2-4 | 146 | 92 | 129 |
| 4-6 | 141 | 92 | 141 |
| 6-8 | 98 | 148 | 119 |
| 8-10 | 94 | 143 | 106 |
| 10-12 | 103 | 100 | 131 |
| 12-14 | 124 | 119 | 98 |
| 14-16 | 136 | 128 | 110 |
| 16-18 | 27 | 135 | 92 |
| 18-20 | 94 | 64 | 46 |

Tabela 8. Melhor Configuração de Válvulas Teste 3

Através dos dados da tabela 8 percebe-se que nos primeiros dezesseis anos de produção as três válvulas podem ser consideradas como abertas, devido aos altos valores de STW encontrados na configuração. A partir do décimo sexto ano até o décimo oitavo ano, a válvula um passa a ter característica de fechada, com baixo valor de STW, e as demais são mantidas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

abertas. Nos dois últimos anos a válvula dois encontra-se em uma posição média e a válvula três pode ser interpretada como fechada.

A figura 28 mostra as curvas de avaliação do desempenho do AG. Analisando a curva *Score*, melhor indivíduo encontrado em cada, percebe-se que o algoritmo genético ainda não convergiu, podendo haver um aumento no número de gerações do algoritmo genético.

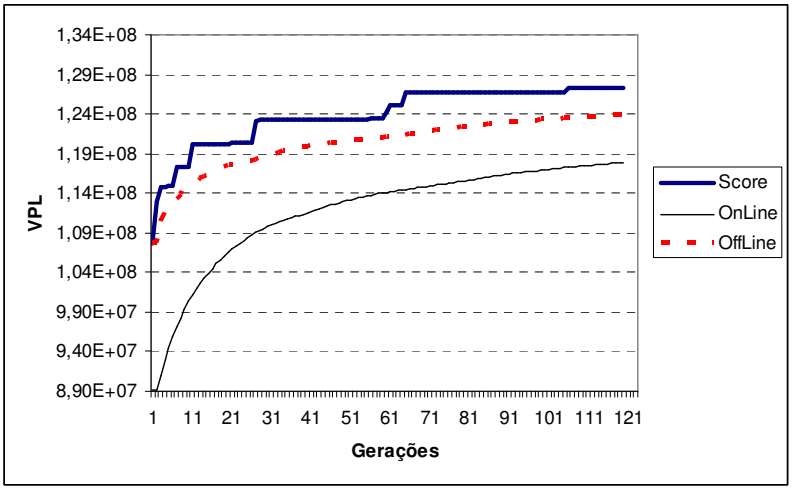


Figura 28. Curvas Algoritmo Genético Teste 3

A figura 29 mostra as curvas de óleo acumulado e água acumulada do caso base e do caso controlado.

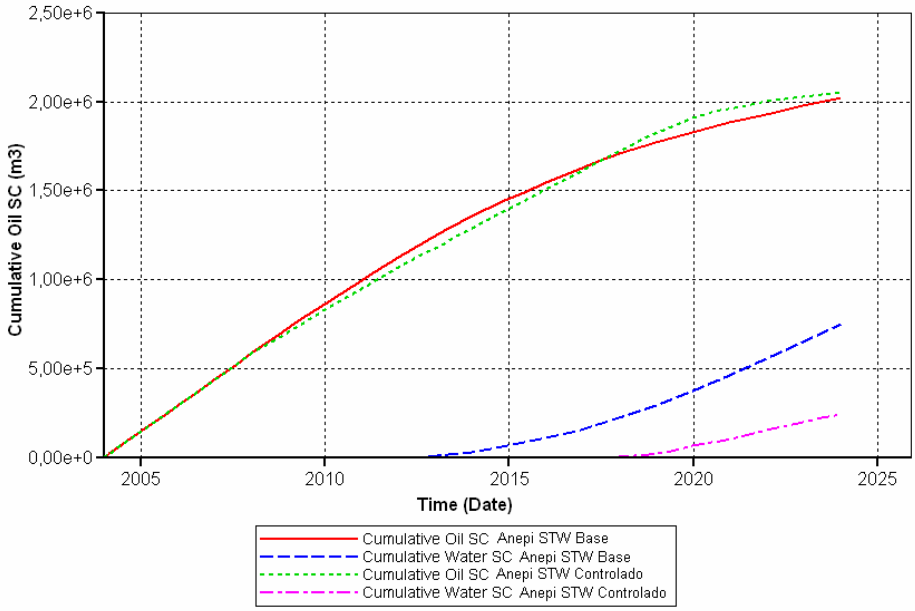


Figura 29. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado Teste 3

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

Nas curvas de óleo acumulado da figura 29 percebe-se que até o ano de 2008 os dois casos têm o mesmo volume de óleo acumulado; a partir desse ano até 2016, o caso base tem um volume maior de óleo acumulado que o caso controlado. De 2017 até o fim do período de explotação o caso controlado passa a ter um volume maior de óleo acumulado.

Para as curvas de água acumulada, o caso controlado atrasa a chegada da frente de água em quase 6 anos com relação ao caso base.

As figuras 30 e 31 mostram a condição do campo com relação à frente de avanço da água para o caso base e o caso controlado, respectivamente.

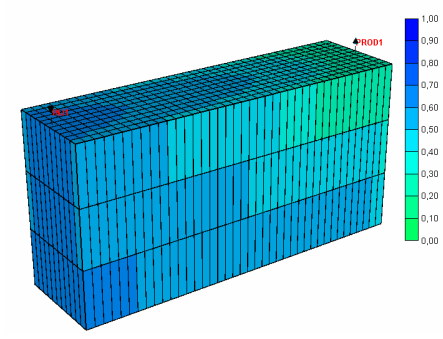


Figura 30. Condição do Campo Caso base – Teste 3

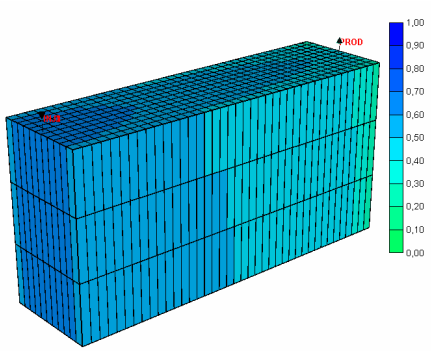


Figura 31. Condição do Campo Caso Controlado – Teste 3

Novamente, o caso controlado consegue um avanço da frente de água mais uniforme do que com relação ao caso base, o que permite aumentar a produção de óleo.

## Teste 4

Conforme tabela 3, as válvulas utilizadas nesse teste são do tipo abertura contínua, variando a vazão de injeção de água (*STW) do poço injetor. Foi usada como semente inicial na inicialização da população do AG o melhor indivíduo encontrado no teste 3.

A tabela 9 mostra os resultados alcançados para o caso base e o caso controlado. Verifica-se, neste teste, que o caso controlado alcançou um aumento do óleo acumulado e uma diminuição na água acumulada de tal forma a garantir um pequeno aumento do VPL.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

| Caso | Base | Controlado | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 127.124.411,35 | 128.386.002,55 | 0,99 |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 2.019.640,00 | 2.056.980.,00 | 1,85 |
| Água Acumulada ($m^3$) | 746.685,00 | 294.075,00 | -60,6 |

Tabela 9. Resultados Teste 4 (reservatório sintético – válvulas abertura contínua)

A tabela 10 a seguir mostra a melhor configuração de válvulas encontrada no teste 4, apresentando os valores de STW para cada válvula, em cada intervalo de tempo.

| ***Tempo (Anos)*** | ***Válvula 1 (Injetor)*** | ***Válvula 2 (Injetor)*** | ***Válvula 3 (Injetor)*** |
|---|---|---|---|
| 0-2 | 146 | **110** | 148 |
| 2-4 | 146 | **132** | 129 |
| 4-6 | 141 | **97** | 141 |
| 6-8 | **90** | 148 | 119 |
| 8-10 | 94 | 143 | **137** |
| 10-12 | **135** | 100 | 131 |
| 12-14 | 124 | 119 | **125** |
| 14-16 | **6** | 128 | 110 |
| 16-18 | 27 | 135 | **128** |
| 18-20 | **140** | 64 | 46 |

Tabela 10. Melhor Configuração de Válvulas Teste 4

Na tabela 10 os valores de STW em vermelho são os que diferem da melhor solução encontrada no teste 3 que serviu de semente inicial para este teste. A alteração mais significativa foi realizada na válvula 1 no intervalo de tempo de décimo quarto ano ao décimo sexto, onde na configuração inicial essa válvula se encontrava aberta,com o valor de STW em 136, e na configuração evoluída ela passa ao estado de fechada, com valor de STW em 6.

A curva *Score* da figura 32 indica uma convergência do algoritmo, já que a partir da geração 45 não é encontrada uma melhor solução.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

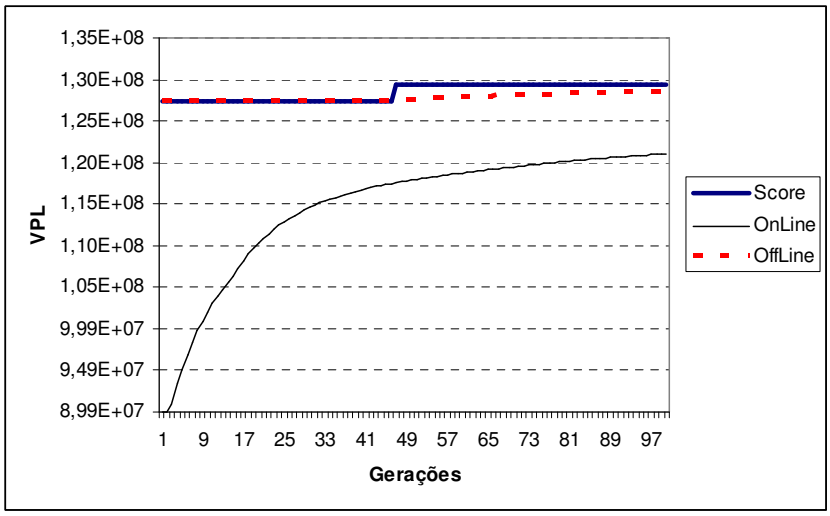


Figura 32. Curvas Algoritmo Genético Teste 4

A figura 33 mostra as curvas de óleo acumulado e água acumulada do caso base e do caso controlado.

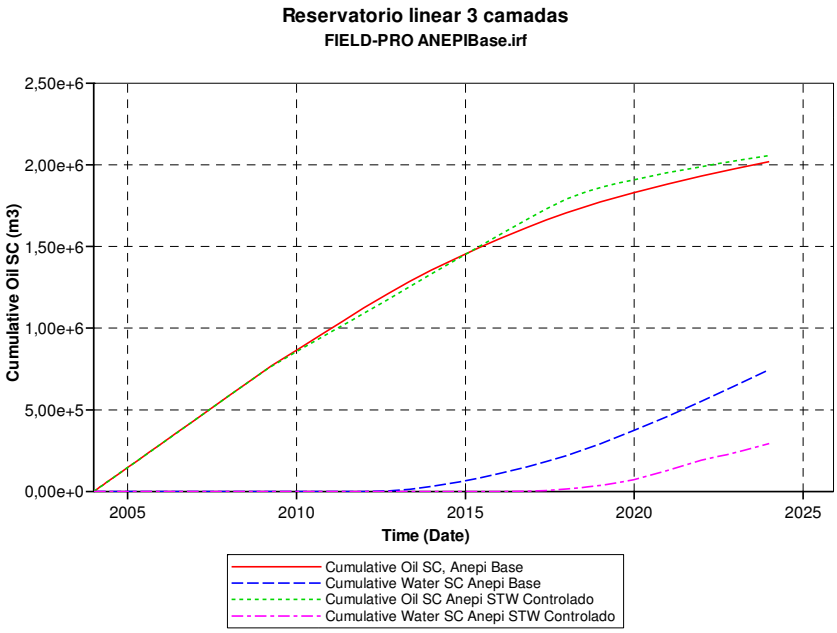


Figura 33. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado Teste 4

Na figura 33 pode-se observar, através das curvas de óleo acumulado, que do ano 2010 à 2015 o volume acumulado de óleo produzido pelo caso controlado e um pouco menor que o caso base. A partir do ano 2015 o caso controlado passa a ter um volume de óleo acumulado maior que o caso base.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

Para as curvas de água acumulada, o caso controlado atrasa a chegada da frente de água em quase 6 anos com relação ao caso base.

As figuras 34 e 35 mostram a condição do campo com relação à frente de avanço da água para o caso base e o caso controlado respectivamente.

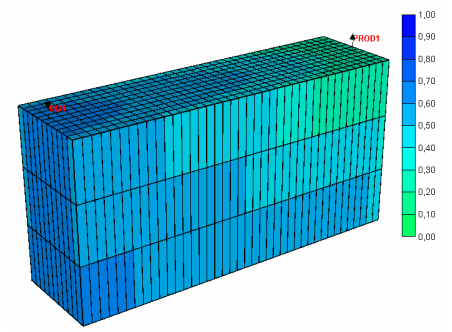


Figura 34. Condição do Campo Caso base – Teste 4

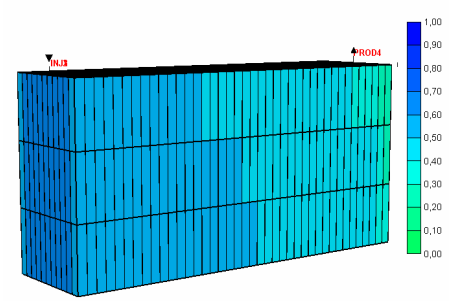


Figura 35. Condição do Campo Caso Controlado – Teste 4

Novamente, o caso controlado consegue um avanço da frente de água mais uniforme do que o caso base, permitindo um aumento na produção de óleo.

De forma a melhor comparar os testes 3 e 4 , a figura 36, a seguir, mostra as curvas de óleo acumulado e água acumulada encontradas em ambos os testes. Através dessas curvas pode-se perceber que os dois testes chegaram a valores finais de óleo acumulado muito próximo, porém no teste 4, do intervalo de 2008 à 2020, consegue-se melhores valores de óleo acumulado que o teste 3, o que privilegia o VPL do teste 4 mesmo tendo produzido mais água.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

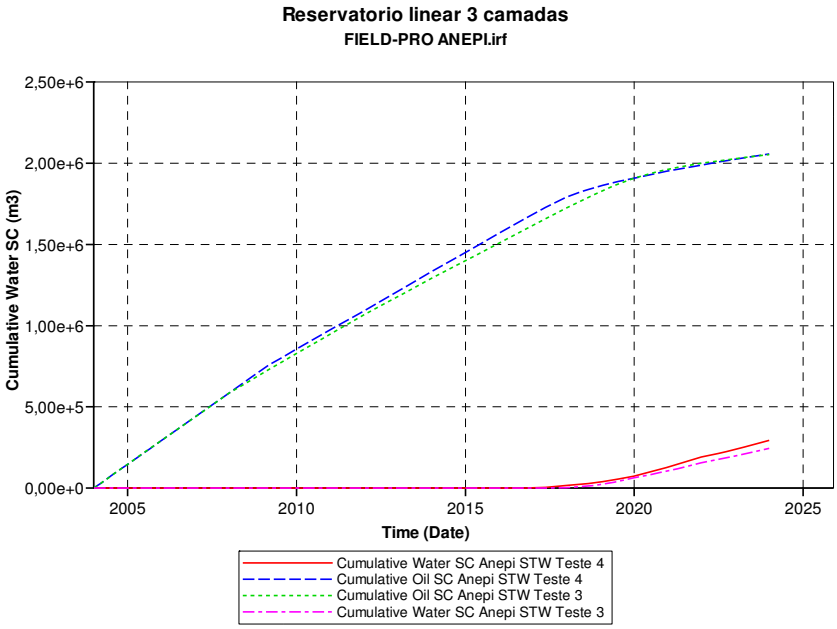


Figura 36. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Controlado teste 3 x Caso Controlado Teste 4

## Teste 5

Conforme tabela 3, esse teste foi realizado considerando as válvulas como sendo do tipo abertura contínua variando o índice de injetividade (*FF) do poço injetor.

A tabela 11 mostra os resultados alcançados para o caso base e o caso controlado.

| Caso | Base | Controlado | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 128.411.174,47 | 133.663.945,43 | 4,09 % |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 2.025.550,00 | 2.132.810,00 | 5,29% |
| Água Acumulada ($m^3$) | 740.325,00 | 618.688,00 | -16,43 |

Tabela 11. Resultados Teste 5 (reservatório sintético – válvulas abertura contínua (FF))

O caso controlado alcançou um aumento do óleo acumulado e uma diminuição na água acumulada de tal forma a garantir um aumento do VPL, mesmo considerando os custos das válvulas.

A tabela 12 a seguir mostra a melhor configuração de válvulas encontrada no teste 5, apresentando os valores de FF de cada válvula, em cada intervalo de tempo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

| *Tempo (Anos)* | *Válvula 1 (Injetor)* | *Válvula 2 (Injetor)* | *Válvula 3 (Injetor)* |
|---|---|---|---|
| 0-2 | 0.7 | 0.2 | 0.0 |
| 2-4 | 0.6 | 0.1 | 0.4 |
| 4-6 | 0.3 | 0.9 | 0.6 |
| 6-8 | 0.3 | 0.1 | 0.5 |
| 8-10 | 0.6 | 0.6 | 0.0 |
| 10-12 | 0.8 | 1.0 | 0.1 |
| 12-14 | 0.6 | 0.5 | 0.3 |
| 14-16 | 1.0 | 0.6 | 0.0 |
| 16-18 | 0.5 | 0.0 | 0.8 |
| 18-20 | 0.6 | 0.5 | 0.9 |

Tabela 12. Melhor Configuração de Válvulas Teste 5

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

Examinando a tabela 12 acima, percebe-se que a válvula 3 manteve-se mais tempo fechada que a válvula 1, isso era esperado dado que a válvula 3 encontra-se na camada de maior permeabilidade e a válvula 1 em uma de menor permeabilidade.

A figura 37 mostra as curvas de desempenho do AG. Analisando a curva Score, melhor indivíduo encontrado em cada geração do algoritmo genético, percebe-se que o algoritmo genético ainda não convergiu, podendo haver um aumento no número de gerações do algoritmo genético.

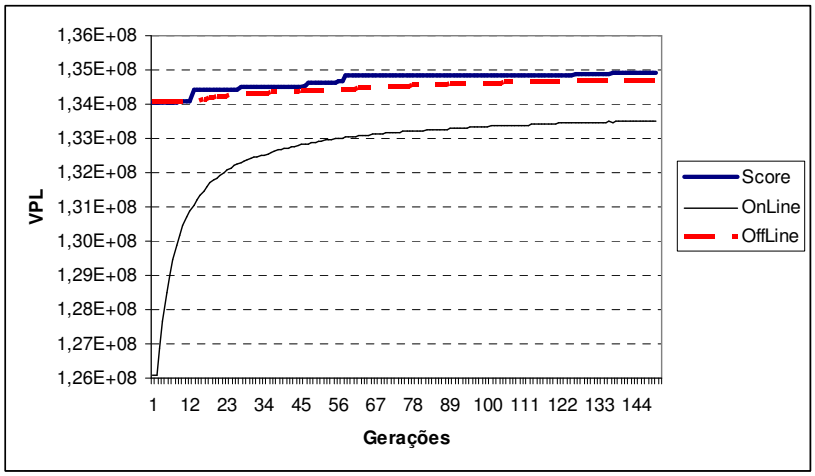


Figura 37. Curvas Algoritmo Genético Teste 5

A figura 38 mostra as curvas de óleo acumulado e água acumulada do caso base e do caso controlado. Através dessa figura, pode-se observar que a

partir do ano 2012, aproximadamente, o caso controlado passa a obter maiores volumes de óleo acumulado com relação ao caso base.

Para as curvas de água acumulada, o caso controlado atrasa a chegada da frente de água em aproximadamente 4 anos com relação ao caso base.

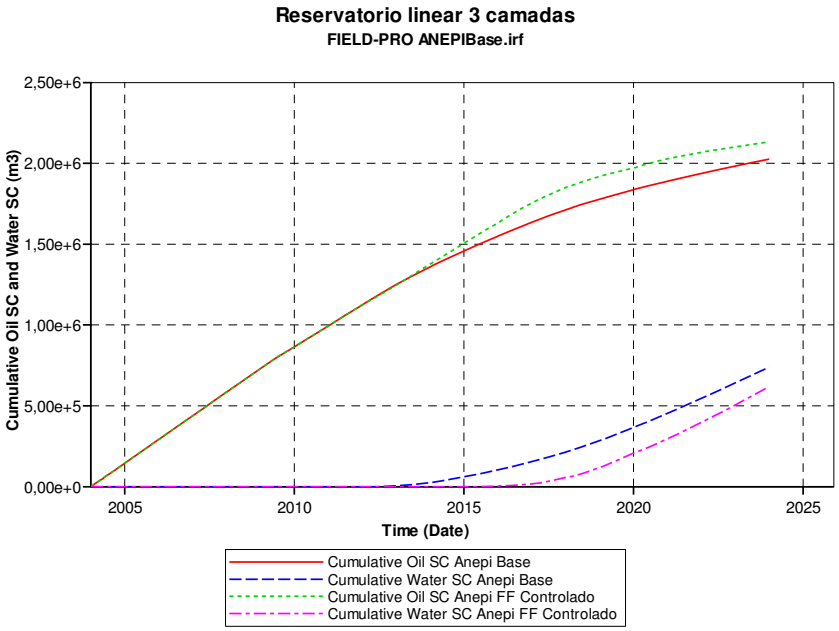


Figura 38. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado Teste 5

As figuras 39 e 40 mostram a condição do campo com relação à frente de avanço da água para o caso base e o caso controlado, respectivamente.

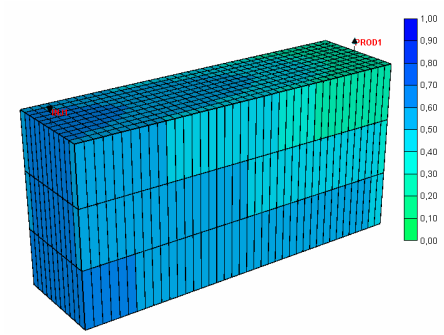


Figura 39. Condição do Campo Caso base – Teste 5

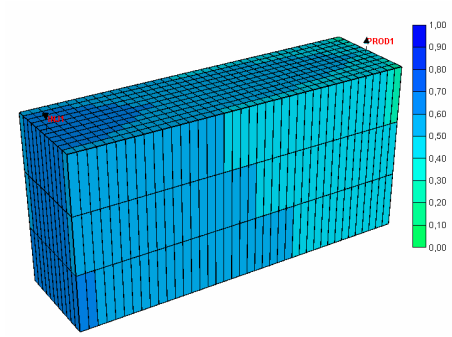


Figura 40. Condição do Campo Caso Controlado – Teste 5

Mais uma vez, o caso controlado obtém um avanço da frente de água mais uniforme do que o caso base, e novamente permite aumentar a produção de óleo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

**Teste 6**

Esse teste foi realizado considerando as válvulas como sendo do tipo abertura contínua variando o índice de injetividade (*FF) do poço injetor. Foi usada como semente inicial na inicialização da população do AG o melhor indivíduo encontrado no teste 5.

A tabela 13 mostra os resultados alcançados para o caso base e o caso controlado.

| Caso | Base | Controlado | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 128.411.174,47 | 133.702.420,67 | 4,12 |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 2.025.550,00 | 2.133.680,00 | 5,34 |
| Água Acumulada ($m^3$) | 740.325,00 | 617.244,00 | -16,62 |

Tabela 13. Resultados Teste 6 (reservatório sintético – válvulas abertura contínua (FF))

O caso controlado alcançou um aumento do óleo acumulado e uma diminuição na água acumulada de tal forma a garantir o aumento do VPL.

A tabela 14, a seguir, mostra a melhor configuração de válvulas encontrada. Nesta tabela os valores de FF em vermelho são os que diferem da melhor solução encontrada no teste 5 que serviu de semente inicial para este teste. As alteração mais significativa encontram-se com um * ao lado. A válvula que mais sofreu alterações foi a válvula 2; a alteração mais significativa foi realizada no intervalo do décimo quarto ano ao décimo sexto ano, onde a válvula passa de um estado com característica de meia abertura para o estado aberto. A válvula 1 sofre apenas uma alteração, que ocorre no intervalo do décimo sexto ano ao décimo oitavo, onde a válvula sai do estado médio para o estado praticamente aberta. A válvula 3 sofre duas alterações, sendo a mais significativa a que ocorre no último intervalo de tempo, onde a válvula passa do estado aberto para um estado médio.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

| *Tempo (Anos)* | *Válvula 1 (Injetor)* | *Válvula 2 (Injetor)* | *Válvula 3 (Injetor)* |
|---|---|---|---|
| 0-2 | 0.7 | 0.2 | 0.0 |
| 2-4 | 0.6 | **0.0** | 0.4 |
| 4-6 | 0.3 | 0.9 | **0.7** |
| 6-8 | 0.3 | 0.1 | 0.5 |
| 8-10 | 0.6 | **0.5** | 0.0 |
| 10-12 | 0.8 | 1.0 | 0.1 |
| 12-14 | 0.6 | **0.4** | 0.3 |
| 14-16 | 1.0 | **0.9*** | 0.0 |
| 16-18 | **0.8*** | 0.0 | 0.8 |
| 18-20 | 0.6 | 0.5 | **0.5*** |

Tabela 14. Melhor Configuração de Válvulas Teste 6

A figura 41 mostra a curva do melhor indivíduo encontrado em cada geração do algoritmo genético (Score). Através dessa curva pode-se perceber que o algoritmo genético está muito próximo de uma convergência, dado que durante oitenta gerações o melhor indivíduo continua o mesmo. Através da figura 42, curvas online e offline, essa convergência fica mais evidente através da tendência de uniformização da população.

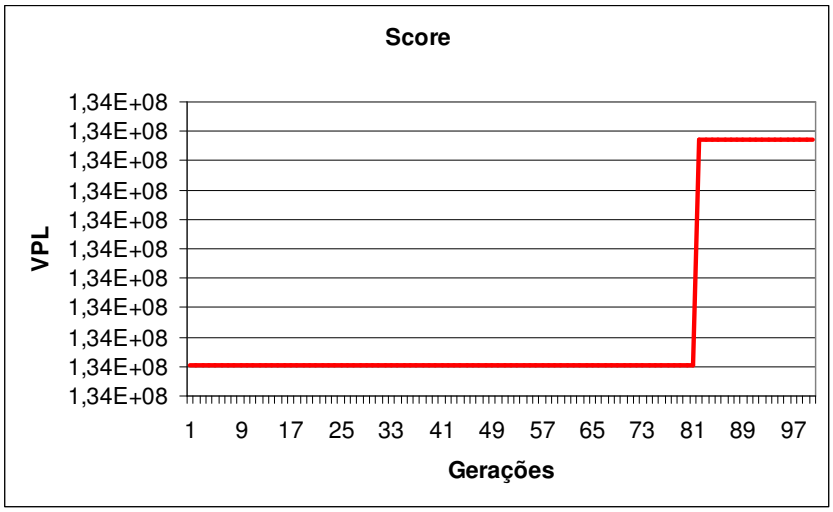


Figura 41. Curva Score Teste 6

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

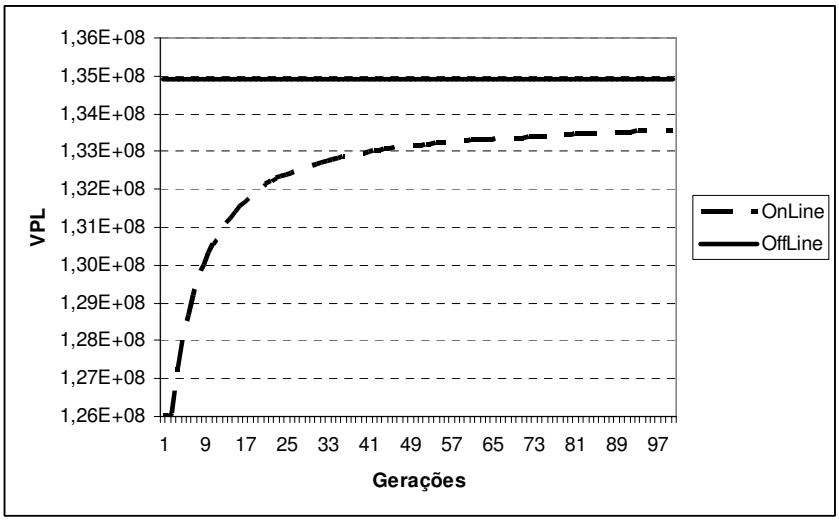


Figura 42. Curvas OnLine e OffLine Teste 6

A figura 43 mostra as curvas de óleo acumulado e água acumulada do caso base e do caso controlado.

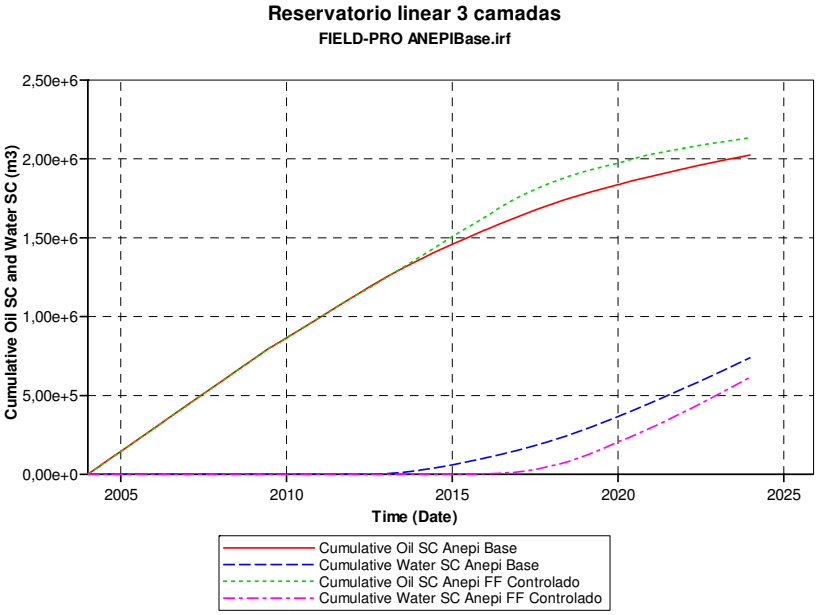


Figura 43. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado Teste 6

Na figura 43 pode-se observar, através das curvas de óleo acumulado, que a partir do ano 2012, aproximadamente, o caso controlado passa a obter maiores volumes de óleo acumulado com relação ao caso base.

Para as curvas de água acumulada, o caso controlado atrasa a chegada da frente de água em aproximadamente 4 anos com relação ao caso base.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

As figuras 44 e 45 mostram a condição do campo com relação à frente de avanço da água para o caso base e o caso controlado, respectivamente.

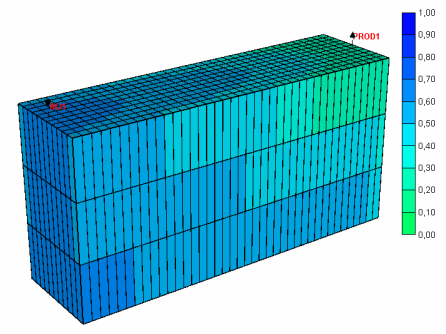


Figura 44. Condição do Campo Caso base – Teste 6

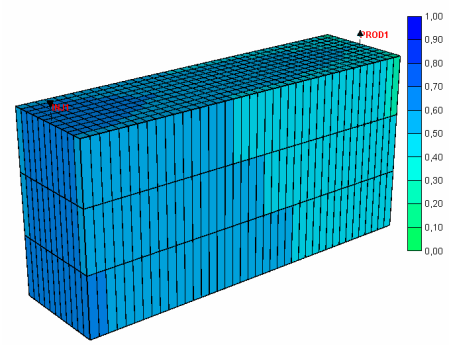


Figura 45. Condição do Campo Caso Controlado – Teste 6

Conforme os testes anteriores, o caso controlado consegue um avanço da frente de água mais uniforme, do que o caso base, permitindo um aumento na produção de óleo.

## Reservatório Real

A alternativa de poços utilizada nos testes realizados nesse reservatório é composta de: seis poços verticais produtores e cinco poços verticais injetores (a descrição dos poços encontra-se no Apêndice B). O número de válvulas existentes nessa alternativa é igual a nove, sendo cinco localizadas em poços produtores e quatro em injetores. O poço produtor localizado em 42,20,1 a 42,20,6 (Prod1), possui uma válvula controlando as três primeiras camadas (primeira região), outra controlando as duas seguintes (segunda região) e a terceira controlando a última camada (terceira região). O poço produtor localizado em 7,36,1 a 7,36,5 (Prod6) possui uma válvula controlando as três primeiras camadas (primeira região) e outra controlando as duas últimas (segunda região). O poço injetor localizado em 43,31,1 a 43,31,5 (Inj3) possui uma válvula controlando as três primeiras camadas (primeira região) e outra controlando as duas últimas camadas (segunda região), onde o poço é perfurado. O poço injetor localizado em 8,23,1 a 8,23,3 e 8,23,6 (Inj4) possui uma válvula controlando as três primeiras camadas (primeira região) e outra controlando a última camada (terceira região). A figura 46 a seguir, mostra a alternativa descrita e indica em vermelho os poços inteligentes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

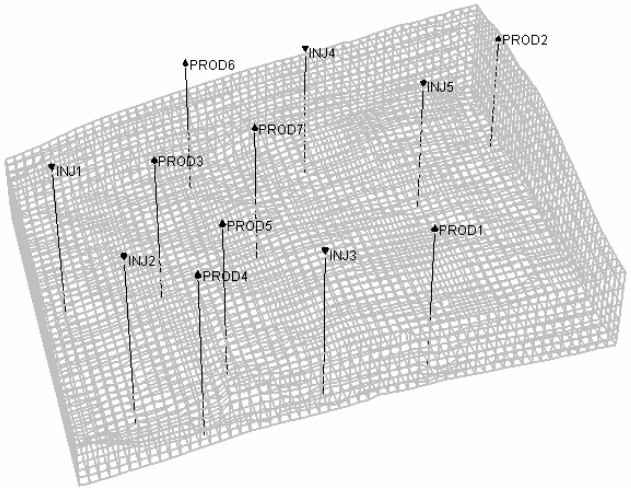


Figura 46. Alternativa utilizada nos testes do reservatório real

Por ser um reservatório com características reais, os testes realizados com esse reservatório têm como objetivo avaliar os resultados do modelo de otimização de controle de válvulas, desenvolvido nesta tese, num cenário real.

Conforme será discutido mais a frente, das representações de válvulas com abertura contínua, a que se mostrou mais eficiente foi a representada pela alteração do FF. Como, na visão do especialista, as válvulas de abertura contínua se mostram mais interessantes que as on/off, os testes realizados com esse reservatório apenas utilizam válvulas de abertura contínua, representadas no simulador IMEX pela alteração do FF.

A tabela 15 abaixo mostra as principais características que diferem os dois testes realizados nesse reservatório.

| **Testes** | **Tipo de Válvula** | **Semente Inicial** |
|---|---|---|
| Teste 7 | Abertura Contínua (FF) | não |
| Teste 8 | Abertura Contínua (FF) | Melhor indivíduo do teste 7 |

Tabela 15. Principais características dos testes do reservatório real

A tabela 16 mostra os parâmetros do algoritmo genético utilizados nos dois testes realizados nesse reservatório. Também para este reservatório, testes com um número menor de gerações e indivíduos foram.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

| Parâmetros do AG | Teste 7 | Teste 8 |
|---|---|---|
| Número de gerações | 150 | 70 |
| Número de indivíduos | 75 | 35 |
| Número de genes | 10 | 10 |
| Número de rodadas | 1 | 1 |
| *Steady-State* | 0.4 | 0.4 |
| Taxa de *crossover* inicial | 0.65 | 0.65 |
| Taxa de mutação inicial | 0.08 | 0.08 |
| Total de Simulações | 11.250 | 2.450 |
| Tempo de processamento | 9 dias | 2 dias |

Tabela 16. Parâmetros do AG

## Teste 7

A tabela 17 mostra os resultados alcançados para o caso base e o caso controlado.

| Caso | Base | Controlado | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 2.883.179.488,82 | 2.833.716.235,74 | 1,75 |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 38.851.500,00 | 39.519.800,00 | 1,72 |
| Água Acumulada ($m^3$) | 51.616.700,00 | 52.427.000,00 | 1,56 |

Tabela 17. Resultados Teste 7 (reservatório real – válvulas abertura contínua (FF))

O caso controlado alcançou um aumento do óleo acumulado de tal forma a garantir um aumento do VPL, mesmo considerando os custos das válvulas.

A tabela 18 a seguir mostra a melhor configuração de válvulas encontrada no teste 7, apresentando os valores de FF de cada válvula, em cada intervalo de tempo.

| ***Tempo (Anos)*** | ***V1 (Prod1)*** | ***V2 (Prod1)*** | ***V3 (Prod1)*** | ***V4 (Prod6)*** | ***V5 (Prod6)*** | ***V6 (Inj3)*** | ***V7 (Inj3)*** | ***V8 (Inj4)*** | ***V9 (Inj4)*** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0-2 | 0.7 | 0.3 | 0.3 | 0.7 | 0.9 | 0.0 | 0.8 | 0.9 | 0.9 |
| 2-4 | 0.7 | 0.9 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0.0 | 0.9 | 0.7 | 0.7 |
| 4-6 | 0.9 | 0.7 | 0.1 | 0.9 | 0.6 | 0.7 | 0.9 | 0.5 | 0.7 |
| 6-8 | 0.9 | 1.0 | 0.7 | 0.6 | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.0 | 0.9 |
| 8-10 | 0.3 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.2 | 0.2 | 0.6 | 0.9 | 0.3 |
| 10-12 | 0.6 | 0.9 | 0.7 | 1.0 | 0.4 | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 0.3 |
| 12-14 | 0.0 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.7 | 0.4 | 0.7 | 0.9 | 0.1 |
| 14-16 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.7 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 0.8 |
| 16-18 | 0.8 | 0.4 | 0.8 | 0.9 | 0.3 | 0.7 | 0.8 | 0.7 | 0.5 |
| 18-20 | 0.3 | 1.0 | 0.2 | 0.9 | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.9 | 1.0 |

Tabela 18. Melhor Configuração de Válvulas Teste 7

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

A figura 47 mostra as curvas *Score*, *Online* e *Offline*. Através, principalmente, das curvas *Score* e *Online* pode-se perceber que o algoritmo genético ainda não convergiu, dado a inclinação dessas curvas, sugerindo um aumento no número de gerações do algoritmo genético.

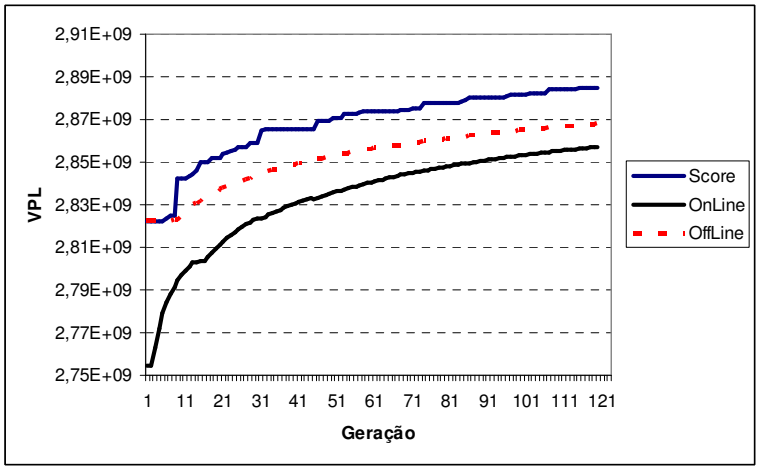


Figura 47. Curvas Algoritmo Genético Teste 7

A figura 48 mostra as curvas de óleo acumulado e água acumulada do caso base e do caso controlado. Através dessas curvas pode-se perceber que, a partir do ano 2010 até o fim do período de explotação, o caso controlado alcança maiores volumes de óleo acumulado que o caso base. A produção de água é iniciada ao mesmo tempo para ambos os casos, base e controlado, sendo que a partir desse momento até aproximadamente o ano de 2023 o caso controlado produz um menor volume acumulado de água que o caso base. As condições privilegiadas de produção acumulada de óleo e água em tempos iniciais ajudam a garantir um melhor VPL para o caso controlado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

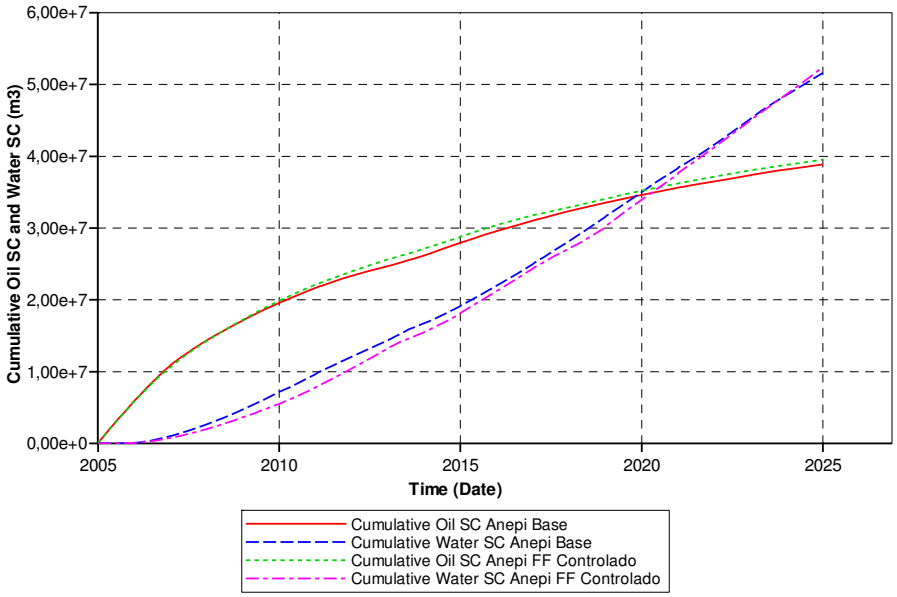


Figura 48. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado Teste 7

Conforme pode ser percebido através das figuras 49 e 50, devido a complexidade do reservatório, torna-se difícil realizar uma avaliação da diferença do avanço da frente de água, para o caso base e o caso controlado, através do modelo 3D, ficando-se somente com a avaliação realizada com as curvas acima.

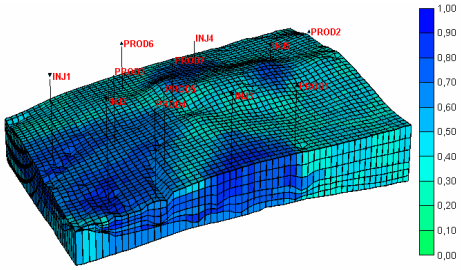


Figura 49. Condição do Campo Caso base – Teste 7

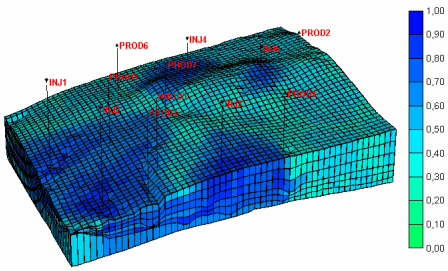


Figura 50. Condição do Campo Caso Controlado – Teste 7

## Teste 8

A tabela 19 mostra os resultados alcançados para o caso base e o caso controlado.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

| Caso | Base | Controlado | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 2.833.716.235,74 | 2.892.407.047,55 | 2,10 |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 38.851.500,00 | 39.611.900,00 | 1,96 |
| Água Acumulada ($m^3$) | 51.616.700,00 | 52.560.300,00 | 1,82 |

Tabela 19. Resultados Teste 8 (reservatório real – válvulas abertura contínua (FF))

O caso controlado alcançou um aumento do óleo acumulado de tal forma a garantir um aumento do VPL, mesmo considerando os custos das válvulas.

A tabela 20, a seguir, mostra a melhor configuração de válvulas encontrada no teste 8, apresentando os valores de FF de cada válvula, em cada intervalo de tempo. Nesta tabela os pontos em vermelho são os que diferem dos encontrados no teste 7, que serviu como semente para este teste. A alteração mais significativa encontra-se com um * ao lado.

| ***Tempo (Anos)*** | ***V1 (Prod1)*** | ***V2 (Prod1)*** | ***V3 (Prod1)*** | ***V4 (Prod6)*** | ***V5 (Prod6)*** | ***V6 (Inj3)*** | ***V7 (Inj3)*** | ***V8 (Inj4)*** | ***V9 (Inj4)*** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0-2 | 0.7 | 0.0 | 0.2 | 0.9 | 0.9 | 0.1 | 0.8 | 0.9 | 0.8 |
| 2-4 | 0.7 | 0.9 | 0.6 | 0.9 | 0.9 | 0.1 | 1.0 | 0.6 | 0.6 |
| 4-6 | 0.9 | 0.4 | 0.1 | 1.0 | 0.6 | 0.5 | 0.9 | 0.4 | 0.7 |
| 6-8 | 1.0 | 1.0 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.5 | 0.5 | 0.0 | 0.9 |
| 8-10 | 0.7 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.3 | 0.2 | 0.6 | 0.7 | 0.3 |
| 10-12 | 0.6 | 1.0 | 0.7 | 1.0 | 0.4 | 0.9 | 0.7 | **0.3*** | 0.3 |
| 12-14 | 0.0 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.7 | 0.4 | 1.0 | 0.9 | 0.3 |
| 14-16 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.7 | 0.4 | 0.6 | 0.5 | 0.8 | 0.9 |
| 16-18 | 0.8 | 0.4 | 0.7 | 0.9 | 0.1 | 0.7 | 0.8 | 1.0 | 0.6 |
| 18-20 | 0.6 | 1.0 | 0.2 | 0.9 | 0.5 | 0.7 | 0.2 | 0.9 | 0.7 |

Tabela 20. Melhor Configuração de Válvulas Teste 8

A figura 51 mostra as curvas *Score*, *Online* e *Offline*. Através da curva *Score* pode-se perceber que o algoritmo genético começa a se aproximar de uma convergência, porém a inclinação da curva ainda indica que mais gerações devem ser executadas. A curva Online demonstra o inicio de uma uniformização da população a partir, aproximadamente, da geração 40.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

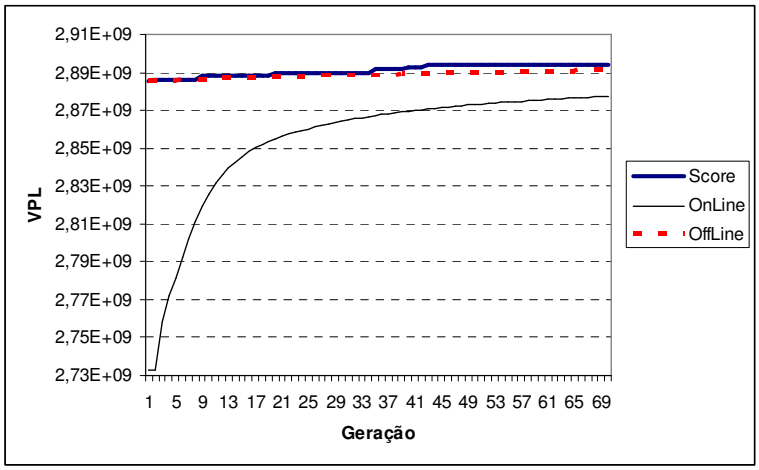


Figura 51. Curvas Algoritmo Genético Teste 8

A figura 52 mostra as curvas de óleo acumulado e água acumulada do caso base e do caso controlado. Percebe-se que, novamente a partir do ano 2010, o caso controlado alcança maiores volumes de óleo acumulado que o caso base. A produção de água do caso controlado assume características semelhantes ao teste 7, iniciando ao mesmo tempo que o caso base, e produzindo um menor volume acumulado de água até o ano de 2023, aproximadamente.

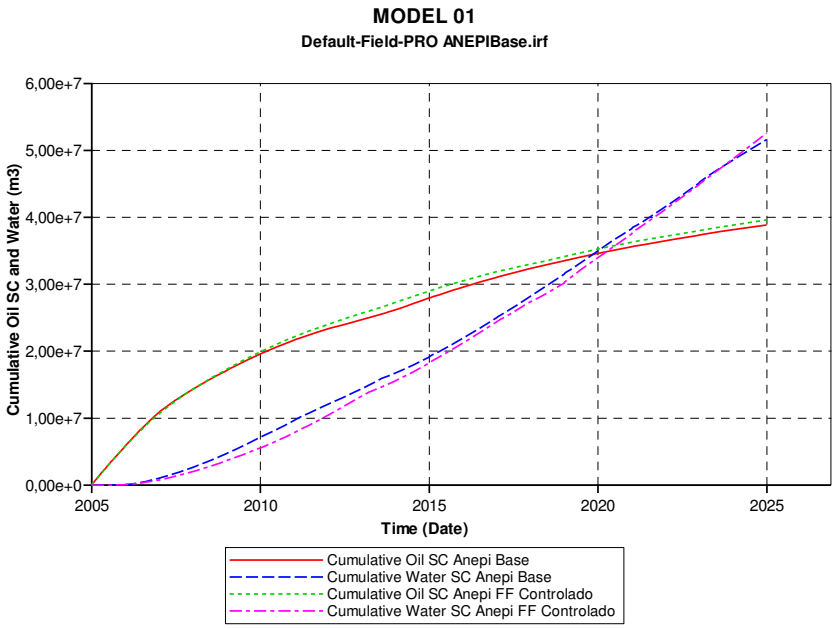


Figura 52. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado Teste 8

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

Novamente, devido a complexidade do reservatório, percebe-se através das figuras 53 e 54, que é difícil avaliar a diferença do avanço da frente de água, para o caso base e o caso controlado, através do modelo 3D.

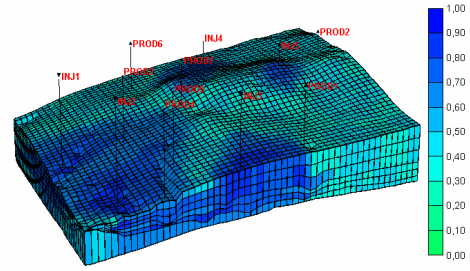


Figura 53. Condição do Campo Caso base – Teste 8

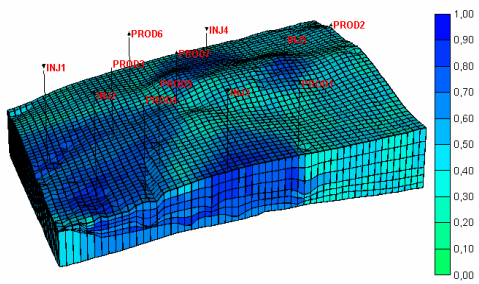


Figura 54. Condição do Campo Caso Controlado – Teste 8

## Reservatório com Aqüífero

A alternativa de poços utilizada nos testes realizados nesse reservatório é composta de poços horizontais, com quatro poços produtores convencionais e quatro poços injetores inteligentes. Sendo, o poço injetor 1 localizado em (7,32,1 ) à (7,37,3), o poço injetor 2 localizado em (14,55,1) à (10,55,3), o poço injetor 3 localizado em (6,15,1) à (2,15,3) e o poço injetor 4 localizado em (31,6,1) à (27,2,3). O número de válvulas existentes nessa alternativa é igual a vinte e quatro, considerando uma válvula em cada completação dos poços injetores. A figura 55 mostra a alternativa descrita.

O especialista responsável pela criação dessa alternativa, criou uma restrição de "*water cut*", a qual impõe que a produção deve parar ao se atingir 90% de "*water cut*". Entende-se por "*water cut*" o percentual de água no total de líquidos produzidos no poço produtor (ou no campo). Esse tipo de restrição normalmente se faz em reservatórios com aqüíferos, que é o caso deste reservatório.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

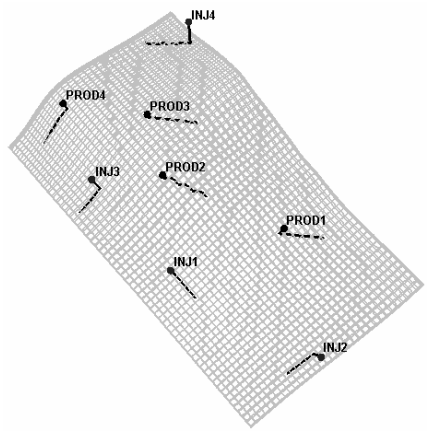


Figura 55. Alternativa utilizada nos testes do reservatório sintético.

Sendo este reservatório também um reservatório que possui características reais, os testes realizados aqui tem como objetivo avaliar os resultados do modelo de otimização de controle de válvulas, desenvolvido nesta tese, em mais um cenário real.

Novamente, os testes realizados com esse reservatório apenas utilizam válvulas de abertura contínua, representadas no simulador IMEX pela alteração do FF.

A tabela 21 abaixo mostra as principais características que diferem os dois testes realizados nesse reservatório.

| Testes | Tipo de Válvula | Semente Inicial |
|---|---|---|
| Teste 9 | Abertura Contínua (FF) | não |
| Teste 10 | Abertura Contínua (FF) | Melhor indivíduo do teste 9 |

Tabela 21. Principais características dos testes do reservatório com aqüífero

A tabela 22 mostra os parâmetros do algoritmo genético utilizados nos dois testes realizados nesse reservatório. Mais uma vez, para este reservatório, testes com um número menor de gerações e indivíduos foram realizados.

| Parâmetros do AG | Teste 9 | Teste 10 |
|---|---|---|
| Número de gerações | 150 | 100 |
| Número de indivíduos | 75 | 60 |
| Número de genes | 10 | 10 |
| Número de rodadas | 1 | 1 |
| *Steady-State* | 0.4 | 0.4 |
| Taxa de *crossover* inicial | 0.65 | 0.65 |
| Taxa de mutação inicial | 0.08 | 0.08 |
| Total de Simulações | 11.250 | 6.000 |
| Tempo de processamento | 37 horas | 20 horas |

Tabela 22. Parâmetros do AG

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

**Teste 9**

Ao examinar-se a figura 57, a seguir, percebe-se que o caso controlado consegue produzir óleo por 20 anos e o caso base tem a produção de óleo interrompida no décimo oitavo ano, isso ocorre devido uma restrição de "*water cut*". Esse tipo de restrição normalmente é feito para reservatórios onde o óleo é deslocado por efeito de um aqüífero ativo (ou também por injeção de água). Pois para reservatórios com essas características, o percentual de água no total de líquidos produzidos pode ficar bastante alto, e tornar inviável a produção de um poço.

Então, as tabelas 23 e 24 a seguir, mostram os resultados alcançados para o caso base e caso controlado produção de 20 anos e caso base e controlado produção de 18 anos, respectivamente.

| Caso | Base (18 anos) | Controlado (20 anos) | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 1.435.068.808,58 | 1.437.211.915,67 | 0,15 |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 19.355.600,00 | 20.047.200,00 | 3,6 |
| Água Acumulada ($m^3$) | 48.527.900,00 | 52.497.800,00 | 8,18 |

Tabela 23. Resultados Teste 9 (reservatório com aqüífero – válvulas abertura contínua (FF) – controlado produção de 20 anos)

| Caso | Base (18 anos) | Controlado (18 anos) | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 1.435.068.808,58 | 1.422.506.211,19 | -0,9% |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 19.355.600,00 | 19.355.600,00 | 0% |
| Água Acumulada ($m^3$) | 48.527.900,00 | 45.179.100,00 | -7% |

Tabela 24. Resultados Teste 9 (reservatório com aqüífero – válvulas abertura contínua (FF) – controlado produção de 18 anos)

Na tabela 23 mostra-se a comparação do caso base com a produção de 20 anos do caso controlado. Nessa tabela o caso controlado alcançou um aumento do óleo acumulado de tal forma a garantir um aumento do VPL, mesmo considerando os custos das válvulas.

Já a tabela 24 mostra a comparação do caso base com a produção de 18 anos do caso controlado. Nessa tabela percebe-se que a influência das válvulas ocorreu no sentido de diminuir a produção de água, mantendo a mesma produção de óleo e causando uma queda no VPL, já que a redução da água produzida não foi suficiente para garantir um aumento do VPL quando se considera os custos das válvulas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

A tabela 25 mostra os valores de FF de cada válvula, em cada intervalo de tempo, da melhor configuração encontrada no teste 9.

| | *Injetor 1* | *Injetor 2* | *Injetor 3* | *Injetor 4* |
|---|---|---|---|---|
| *Tempo (Anos)* | $V_1$ $V_2$ $V_3$ $V_4$ $V_5$ $V_6$ | $V_1$ $V_2$ $V_3$ $V_4$ $V_5$ $V_6$ | $V_1$ $V_2$ $V_3$ $V_4$ $V_5$ $V_6$ | $V_1$ $V_2$ $V_3$ $V_4$ $V_5$ $V_6$ |
| 0-2 | 0.3 0.0 0.7 0.0 0.8 0.8 | 0.8 0.9 0.0 0.8 0.1 0.5 | 0.9 0.9 0.9 0.5 0.3 0.9 | 0.9 0.8 0.0 0.5 0.6 0.9 |
| 2-4 | 0.4 0.9 0.5 0.8 0.0 0.6 | 0.6 0.8 0.6 0.7 0.9 0.7 | 1.0 0.5 0.6 0.7 0.2 0.5 | 0.7 0.6 0.9 0.2 1.0 0.8 |
| 4-6 | 0.4 0.4 0.5 0.1 0.4 0.8 | 0.7 1.0 0.2 0.7 1.0 0.6 | 0.8 0.2 0.5 0.1 0.4 0.8 | 0.5 0.8 0.7 0.8 0.5 0.7 |
| 6-8 | 0.7 0.7 0.6 0.7 0.7 0.5 | 0.3 0.5 0.9 0.2 0.3 0.7 | 0.9 0.1 0.5 0.8 0.2 0.8 | 0.9 0.5 0.9 0.6 0.7 0.6 |
| 8-10 | 0.8 0.7 0.1 0.5 0.4 0.5 | 0.9 0.7 0.5 0.2 0.2 0.5 | 0.8 0.6 0.0 0.1 0.5 0.4 | 0.7 0.8 0.4 0.8 0.9 0.1 |
| 10-12 | 0.5 0.9 0.6 0.4 0.2 0.1 | 0.8 0.7 0.9 0.4 0.9 0.0 | 0.0 0.5 0.5 0.8 0.5 0.4 | 0.5 0.0 0.3 0.2 0.6 0.8 |
| 12-14 | 0.1 0.8 0.7 0.4 0.8 0.7 | 0.0 0.1 0.5 0.1 0.0 0.0 | 0.1 0.9 0.1 0.8 0.8 0.6 | 0.1 0.5 0.9 0.2 1.0 0.0 |
| 14-16 | 0.3 0.8 0.7 0.3 0.1 0.2 | 0.7 0.6 0.6 0.5 0.5 0.8 | 0.1 0.7 0.6 0.4 0.0 0.4 | 0.8 0.0 0.3 0.9 0.8 0.1 |
| 16-18 | 0.2 0.1 0.2 0.2 0.0 0.0 | 0.7 0.0 0.8 0.2 0.5 0.9 | 0.2 0.7 1.0 0.1 0.4 0.3 | 0.8 0.3 0.6 0.4 0.1 0.6 |
| 18-20 | 0.6 0.7 0.6 0.1 0.5 0.6 | 0.3 0.9 0.4 0.3 0.1 0.5 | 0.0 0.0 0.2 0.2 0.1 0.0 | 0.4 0.6 0.9 0.7 0.9 0.9 |

Tabela 25. Melhor Configuração de Válvulas Teste 9

A figura 56 mostra a curva do melhor indivíduo encontrado em cada geração do algoritmo genético (Score). Através dessa curva pode-se perceber que o algoritmo genético ainda não convergiu, indicando a necessidade da execução de mais gerações.

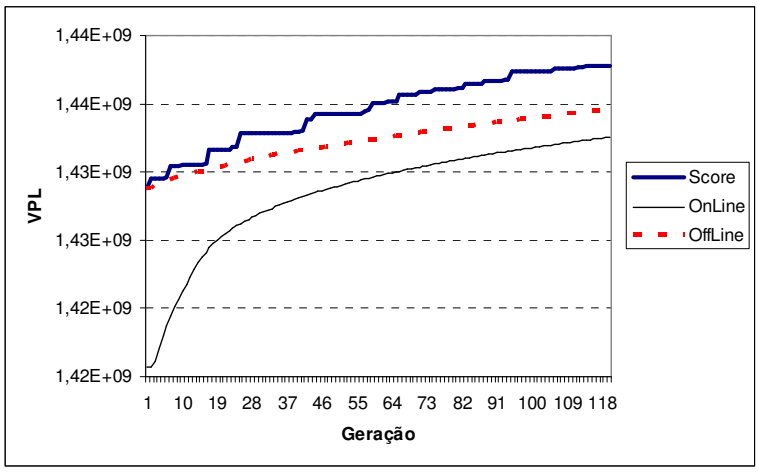


Figura 56. Curvas Algoritmo Genético Teste 9

Conforme mencionado anteriormente, os testes foram realizados para 20 anos de simulação, iniciando no ano de 2002 e finalizando no ano de 2022. analisando-se as curvas da figura 57, percebe-se que o caso base somente produz óleo e água até o ano de 2020; já o caso controlado consegue produzir

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

os 20 anos chegando ao ano de 2022. Isso ocorre devido a restrição de "*water cut*" feita para o reservatório. Sendo assim, o uso de válvulas nesse reservatório torna-se interessante para se alcançar uma maior produção de óleo através do aumento do tempo de vida do poço produtor.

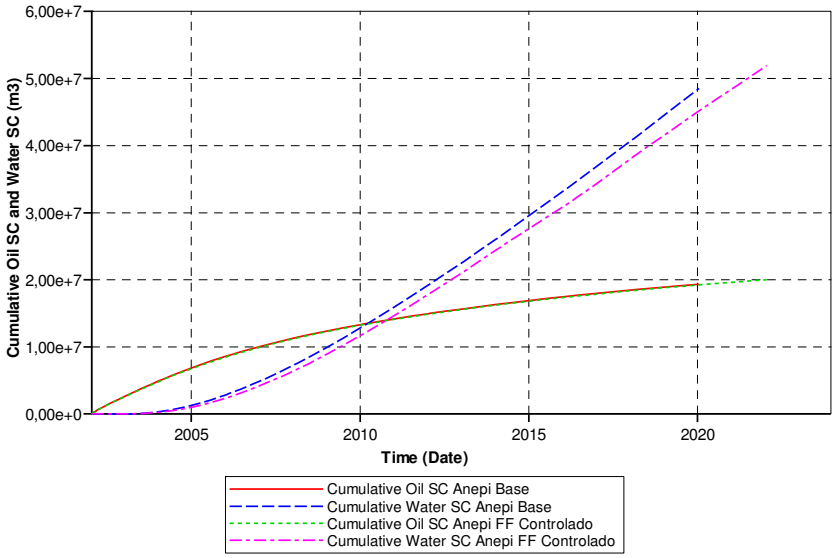


Figura 57. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado Teste 9

As figuras 58 e 59 mostram a condição do campo com relação à frente de avanço da água para o caso base e o caso controlado, respectivamente. Devido a complexidade deste reservatório, torna-se difícil uma análise do avanço da frente de água através do modelo 3 D.

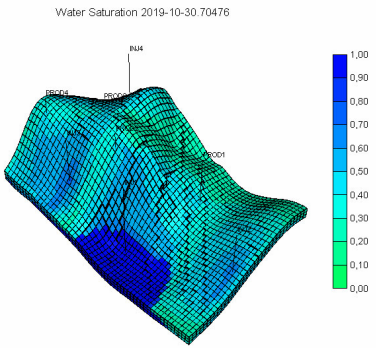


Figura 58. Condição do Campo Caso base – Teste 9

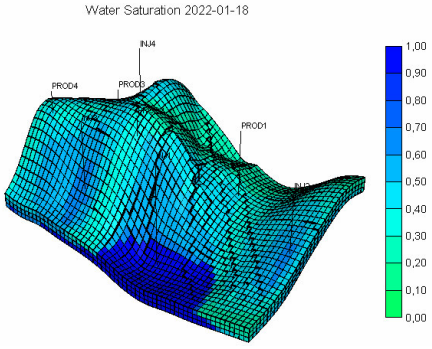


Figura 59. Condição do Campo Caso Controlado – Teste 9

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

**Teste 10**

Novamente, devido uma restrição de "*water cut*", o caso controlado consegue produzir óleo por 20 anos e o caso base tem a produção de óleo interrompida no décimo oitavo ano.

Sendo assim, as tabelas 26 e 27 a seguir, mostram os resultados alcançados para o caso base e caso controlado produção de 20 anos e caso base e controlado produção de 18 anos, respectivamente.

| Caso | Base (18 anos) | Controlado (20 anos) | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 1.435.068.808,58 | 1.442.179.977,78 | 0,5 |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 19.355.600,00 | 20.066.100,00 | 3,7 |
| Água Acumulada ($m^3$) | 48.527.900,00 | 51.016.300,00 | 5,1 |

Tabela 26. Resultados Teste 10 (reservatório com aqüífero – válvulas abertura contínua (FF) - controlado produção de 20 anos)

| Caso | Base (18 anos) | Controlado (18 anos) | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 1.435.068.808,58 | 1.432.237.864.77 | -0,2% |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 19.355.600,00 | 19.355.600,00 | 0% |
| Água Acumulada ($m^3$) | 48.527.900,00 | 44.250.500,00 | -8,8% |

Tabela 27. Resultados Teste 10 (reservatório com aqüífero – válvulas abertura contínua (FF) - controlado produção de 18 anos)

Analisando os resultados apresentados nas tabelas 26 e 27 percebe-se novamente que o uso de poços inteligentes prolonga a vida do poço produtor, permitindo um aumento do VPL com relação ao caso base. A tabela 27 mostra que o caso controlado, até o décimo oitavo ano, possui a mesma produção acumulada de óleo que o caso base, porém o caso controlado consegue uma menor produção de água acumulada que o caso base.

A tabela 28 mostra os valores de FF de cada válvula, em cada intervalo de tempo, da melhor configuração encontrada no teste 10.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

| | *Injetor 1* | *Injetor 2* | *Injetor 3* | *Injetor 4* |
|---|---|---|---|---|
| *Tempo (Anos)* | $V_1$ $V_2$ $V_3$ $V_4$ $V_5$ $V_6$ | $V_1$ $V_2$ $V_3$ $V_4$ $V_5$ $V_6$ | $V_1$ $V_2$ $V_3$ $V_4$ $V_5$ $V_6$ | $V_1$ $V_2$ $V_3$ $V_4$ $V_5$ $V_6$ |
| 0-2 | 0.4 0.7 0.8 0.9 0.6 0.7 | 0.9 0.8 0.1 0.7 0.8 0.1 | 1.0 1.0 0.7 0.5 0.3 0.9 | 1.0 0.9 0.0 0.9 0.7 0.5 |
| 2-4 | 0.0 0.1 0.5 0.9 0.6 0.4 | 0.8 0.7 0.5 0.8 0.9 0.8 | 0.9 0.9 0.8 0.0 0.4 0.5 | 0.9 0.9 1.0 0.8 1.0 0.6 |
| 4-6 | 0.1 0.0 0.5 0.7 0.1 0.9 | 0.8 0.9 0.8 0.7 1.0 0.9 | 0.3 0.2 0.6 0.2 0.5 0.7 | 0.9 0.8 0.8 0.6 0.9 0.8 |
| 6-8 | 0.5 0.1 0.2 0.4 0.1 0.4 | 1.0 0.6 0.7 0.3 0.6 1.0 | 0.6 0.0 0.6 0.7 0.6 0.2 | 0.8 0.7 0.9 0.5 0.7 0.7 |
| 8-10 | 0.4 0.2 0.0 0.8 0.1 0.1 | 0.0 0.0 1.0 0.9 0.3 0.5 | 0.9 0.6 0.9 0.3 0.5 0.4 | 0.8 0.5 0.3 0.9 0.4 0.7 |
| 10-12 | 0.8 0.1 0.6 0.6 0.2 0.9 | 0.7 0.8 0.8 0.4 0.9 0.3 | 0.5 0.9 0.8 0.4 0.4 0.5 | 0.6 0.7 0.3 0.7 0.8 0.8 |
| 12-14 | 0.7 0.3 0.5 0.0 0.4 0.8 | 0.1 0.2 0.1 0.0 0.0 0.1 | 0.2 0.7 0.1 0.4 0.9 0.4 | 0.2 0.2 0.0 0.8 0.9 0.8 |
| 14-16 | 0.5 0.1 0.5 0.3 0.1 0.1 | 0.6 0.2 0.6 0.5 0.0 0.2 | 0.4 0.7 0.2 0.4 0.3 0.2 | 0.6 0.7 0.8 0.9 0.8 0.1 |
| 16-18 | 0.4 0.0 0.2 0.6 0.2 0.6 | 0.3 0.7 0.7 0.2 0.2 0.6 | 0.3 0.5 0.8 0.1 0.2 0.6 | 0.2 0.3 0.6 0.1 0.4 0.8 |
| 18-20 | 0.8 0.2 0.4 1.0 0.3 0.5 | 0.6 0.7 0.4 0.7 0.4 0.1 | 0.0 0.0 0.3 0.0 0.2 0.0 | 0.7 0.2 0.9 0.7 1.0 0.9 |

Tabela 28. Melhor Configuração de Válvulas Teste 10

A figura 60 mostra as curvas *Score*, *Online* e *Offline* do algoritmo genético. Através da inclinação da curva Score pode-se perceber que o algoritmo genético começa a convergir. Porém a curva Online, devido ao surgimento de patamares mais extensos, mas a inclinação da curva ainda indica a necessidade de mais gerações.

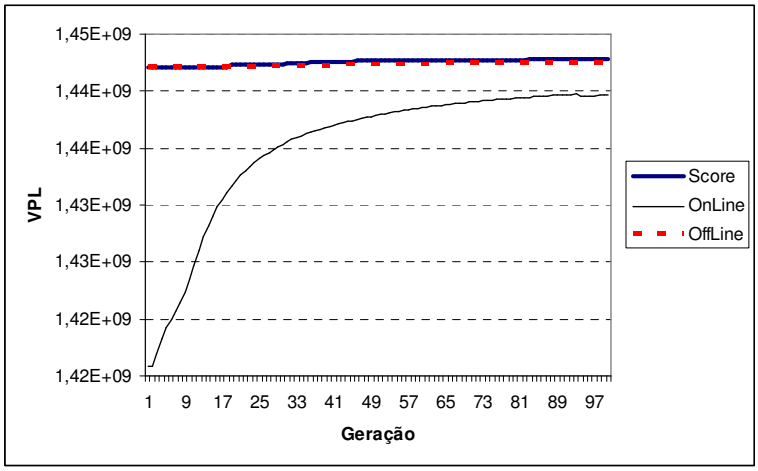


Figura 60. Curvas Algoritmo Genético Teste 10

Analisando-se a figura 61, novamente devido a restrição de "*water cut*" feita para o reservatório, o caso base produz óleo e água até o ano de 2020; e o caso controlado consegue produzir até o ano de 2022, completando os 20 anos de produção.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

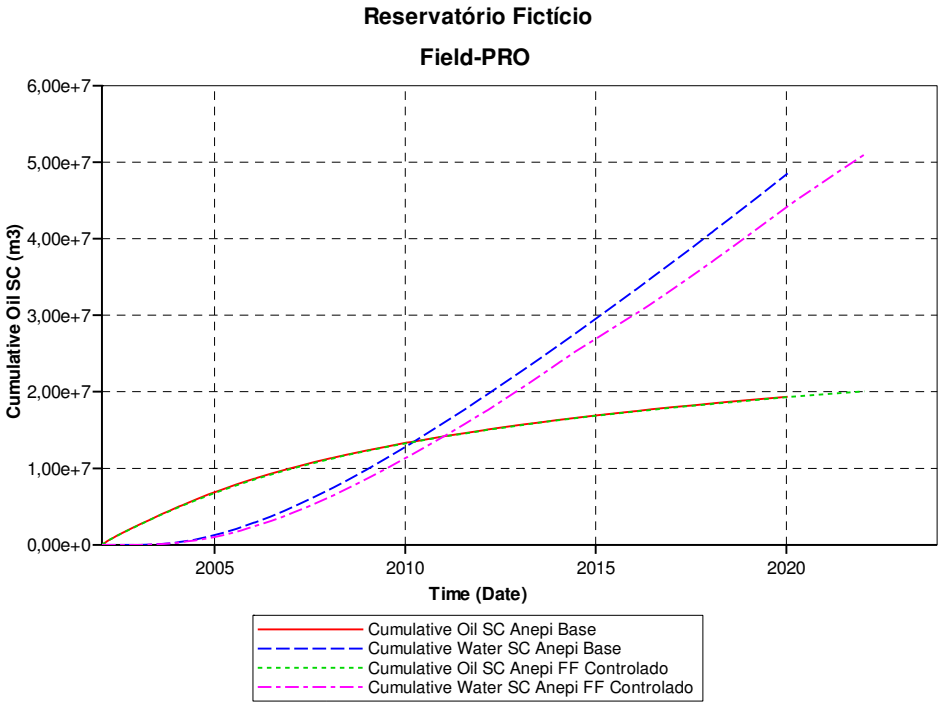


Figura 61. Curva de Óleo e Água Acum. Caso Base x Caso Controlado Teste 10

As figuras 62 e 63 mostram a condição do campo com relação à frente de avanço da água para o caso base e o caso controlado, respectivamente. Mais uma vez, devido a complexidade deste reservatório, torna-se difícil uma análise através do modelo 3 D. Sendo o modelo 2D, representado pela figura 61, o mais indicado para análise do resultado.

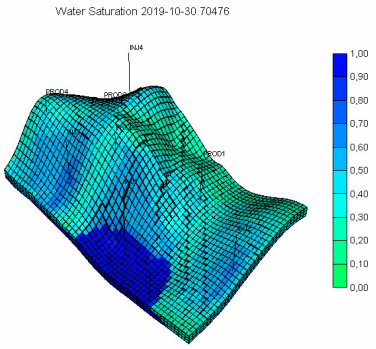


Figura 62. Condição do Campo Caso base – Teste 10

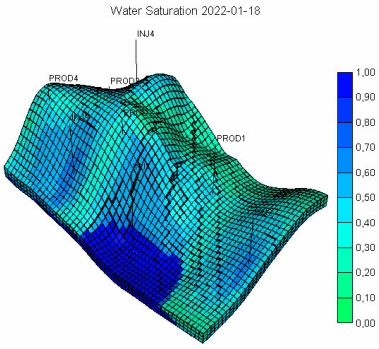


Figura 63. Condição do Campo Caso Controlado – Teste 10

### 5.2.4 Discussões

Nesta seção, foram realizados testes com o modelo de otimização de controle de válvulas sem incertezas. Esses testes tiveram o objetivo de avaliar o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

desempenho do modelo de otimização bem como as representações de válvulas.

O modelo de otimização de controle de válvulas, por algoritmo genético, consegue encontrar estratégias otimizadas de controle de válvulas que chegam a valores de VPL maiores do que os casos bases, em todos os reservatórios utilizados. O aumento do VPL ocorreu devido ao aumento da produção de óleo; ou diminuição da produção de água; ou atraso da chegada da frente de água ou ainda pela antecipação da produção de óleo.

Com relação as representações de válvulas desenvolvidas, de forma a se permitir o uso de poços inteligentes no simulador IMEX, a representação on/off apresentou um bom desempenho, porém o universo de trabalho deste tipo de válvula é mais restrito, dado que o estado da válvula somente assume dois valores aberto e fechado.

Já a representação com o operador de STW (vazão de injeção de água) não se mostrou a mais adequada, devido a uma restrição que existe com relação aos máximos valores declarados de STW e BHP (pressão de fundo). Neste restrição tem-se que, ao se especificar um STW com um determinado valor, o poço injetor vai tentar injetar água de forma a atingir esse valor; porém se, a passagem do fluxo for dificultada, ocorrerá um aumento da pressão BHP. Quando o BHP chega ao seu valor máximo, o STW volta a diminuir de forma a respeitar a máxima pressão BHP atingida. Sendo assim, dependendo das condições do campo, o simulador pode ignorar a informação gerada pelo algoritmo genético. Como exemplo, no reservatório sintético a primeira camada possui a menor permeabilidade, o que dificulta a passagem do fluxo, então os valores determinados pelo algoritmo otimizador para o operador STW, são ignorados pelo simulador, a partir do momento em que o BHP atinge o valor máximo declarado nessa camada. Não conseguindo um aumento significativo na produção de óleo o algoritmo genético busca então uma maior redução de produção de água. Percebe-se então que, para essa representação de válvula, o algoritmo genético consegue uma diminuição do volume acumulado de água produzida muito significativa, cerca de 60%, porém o ganho do volume acumulado de óleo é menor que as demais representações.

A representação de válvula multiposições através da alteração do índice de injetividade (FF) do poço se mostrou mais adequada, do que a alteração do operador STW. Isso porque o FF representa a fração do tubo de produção que está realmente liberada para produção ou injeção, simulando assim, de forma mais real, o comportamento de uma válvula multiposição.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

## 5.3
## Otimização de Controle de Válvulas em Poços Inteligentes com Incerteza de Falha

Nesse estudo de caso avalia-se os resultados obtidos com o modelo proposto para otimização de controle de válvulas de poços inteligentes com incertezas técnicas. Conforme visto na seção 4, esse modelo visa a realizar uma análise para tomada de decisão a partir das incertezas técnicas (falhas), onde o módulo de otimização utiliza o módulo de tratamento de incerteza de falha. Obtém-se os VPL's das operações otimizadas para todos os cenários gerados e calcula-se a média dos VPL's dessas soluções. Esta média indica a viabilidade do uso de poços inteligentes na alternativa em análise considerando-se a possibilidade de falhas.

Os testes foram realizados rodando um algoritmo genético distribuído, descrito na seção 3.2.2, onde o módulo de avaliação é a parte executada dentro do ambiente paralelo. O uso de um ambiente paralelo nos testes dessa seção se fez necessário devido ao grande número de simulações exigidas. Foram realizados testes com os dois modelos: o modelo onde não existe substituição de válvulas em caso de falha; e o modelo onde a válvula é substituída caso ocorra falha.

### 5.3.1 Análise sem reparação de válvula

Nesse estudo de caso, a válvula é considerada operante até que a primeira indicação de falha ocorra. A partir desse ponto até o fim do período de explotação a válvula é considerada inoperante e mantida totalmente aberta.

#### 5.3.1.1 Função de Avaliação

A seguir é relembrada a função de avaliação descrita no capítulo 4:

1. Uma configuração das válvulas é inserida no simulador;
2. As válvulas são controladas somente nos intervalos de tempo onde não ocorreram falhas, nos demais elas são consideradas abertas;
3. O simulador fornece o perfil de produção para esta configuração, dado o cenário de falha;
4. A partir do perfil obtido, calcula-se o Valor Presente Líquido do Reservatório.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

O cálculo do VPL é feito conforme descrito na seção 4.2.1, sendo que na equação 6, que descreve o cálculo do custo operacional, o valor do custo da válvula não é considerado, já que as válvulas não sofrem substituição, pois conforme descrito acima, a partir do momento em que a válvula falha ela é considerada inoperante permanecendo aberta. Logo, o custo das válvulas existentes na alternativa é considerado apenas uma vez, no cálculo do custo de desenvolvimento das válvulas, descrito na equação 2 da seção 4.2.1.

Os valores dos parâmetros utilizados no cálculo do VPL são os mesmos descritos na tabela 1.

#### 5.3.1.2 Apresentação dos Resultados

A seguir, é apresentado o teste realizado com o algoritmo de Otimização de controle de válvulas em poços inteligentes com incertezas de falha, sem reposição de válvulas. Optou-se pelo uso do reservatório sintético para realização dessa tese. A alternativa de poços, utilizada nesse teste, é a mesma descrita para os testes da seção 5.2. Essa alternativa é composta de: um poço vertical injetor (1,6,3) e um poço vertical produtor (40,6,3) (a descrição dos poços encontra-se no Apêndice B). O número de válvulas existentes também é igual a três (considerando uma válvula em cada camada completada do poço injetor).

Conforme discutido na seção 5.2.5, a melhor representação de válvulas de abertura contínua, foi a realizada através da variação do índice de injetividade (*FF) do poço inteligente. Como foi demonstrado um maior interesse do especialista por válvulas de abertura contínua, optou-se novamente pelo uso dessas válvulas para o teste dessa seção.

Também para esse teste, o período de realização do controle das válvulas foi de 2 anos, para um período total de simulação de 20 anos. Sendo assim, existem dez intervalos de tempo onde as válvulas podem ou não sofrer alteração no seu estado. Novamente foi utilizado o período de 2 anos para controle das válvulas devido indicação de um especialista.

Conforme mencionado na seção 4.3.1, a função de distribuição mais conveniente para representar a distribuição de vida dos produtos (válvulas), onde a taxa de falhas varia com o tempo, é a distribuição Weibull. As características e parâmetros da Weibull, utilizada nessa tese, encontram-se no Apêndice A.

Foram feitas 600 simulações Monte Carlo, sendo 200 obtidas de uma seqüência pseudo aleatória e 400 de uma seqüência quase Monte Carlo de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

Sobol. Esses testes foram rodados utilizando processamento paralelo em 20 máquinas, AMD ATHLON XP 2600. O processamento paralelo foi implementado conforme pseudocódigo mostrado na Figura 7 do capítulo 3. O tempo médio de uma simulação é de 4 segundos.

A tabela 29 a seguir possui os valores dos parâmetros do algoritmo genético utilizado nesse teste. O número de gerações e de indivíduos foi escolhido tendo como base os testes realizados com esse reservatório, na seção 5.2, onde incertezas não são consideradas.

| **Parâmetros do AG** | **Valor** |
|---|---|
| Número de gerações | 100 |
| Número de indivíduos | 65 |
| Número de genes | 10 |
| Número de rodadas | 1 |
| *Steady-State* | 0.4 |
| Taxa de *crossover* inicial | 0.65 |
| Taxa de mutação inicial | 0.08 |
| [1]Total de Simulações | 3.900.000 |
| Tempo de Processamento | 9 dias |

Tabela 29. Parâmetros do AG

A tabela 30 mostra os resultados alcançados para o caso base e o caso controlado, bem como o desvio padrão dos VPL's otimizados para cada cenário. O resultado apresentado para o caso controlado representa a média dos VPL's otimizados para cada cenário gerado. O aumento do VPL no caso controlado indica a viabilidade do uso de poços inteligentes nesse reservatório, mesmo levando em consideração a possibilidade de ocorrência de falhas. A diferença entre o VPL controlado médio e o desvio padrão é um valor maior que o VPL base ($\overline{VPL} - \sigma > VPL_{Base}$), reforçando que os VPL's encontrados nos casos controlados foram melhores que o caso base.

| Caso | Base | Controlado Médio | Aumento % | Desvio Padrão (σ) |
|---|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 128.411.174,47 | 131.364.205,24 | 2,3% | 1.790.733,1 |

Tabela 30. Resultados Teste sob incerteza de falha, sem reposição de válvula

[1] O total de simulações é calculado da seguinte forma: TS = Nº. Iterações MC x Nº. Gerações x Nº. indivíduos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

A figura 64 mostra o histograma dos VPL's otimizados encontrados para os cenários gerados nas simulações Monte Carlo. O ponto vermelho no gráfico representa o VPL base.

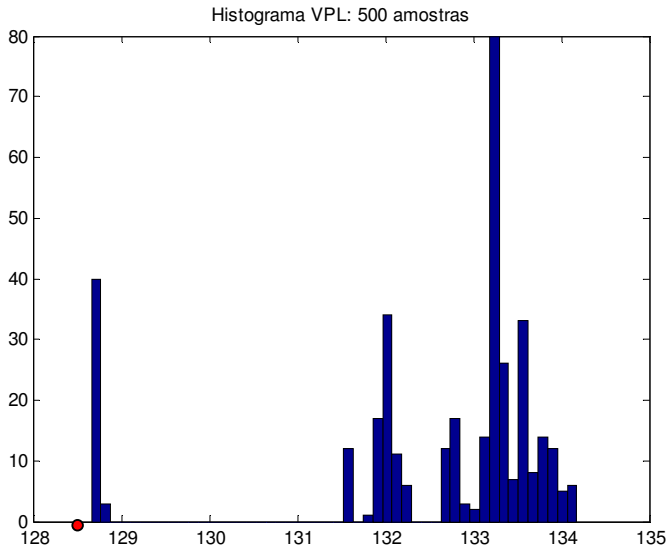


Figura 64. Histograma VPL's – Incerteza Técnica sem substituição de válvulas

Para explicar a ausência de valores de VPL's entre 129.000.000,00 e 131.500.000,00 existentes no histograma mostrado na figura 64, foi realizada uma análise dos cenários de falhas, gerados para cada iteração Monte Carlo.

Através dessa análise, percebe-se que sempre que a válvula três, localizada na camada de maior permeabilidade, encontra-se falha desde o primeiro intervalo, o algoritmo de otimização não consegue alcançar valores melhores que 129.000.000,00. Porém, quando o cenário gerado faz com que a válvula três funcione pelo menos no primeiro intervalo de tempo, o algoritmo otimizador consegue chegar a valores de VPL maiores que 131.000.000,00 nas soluções otimizadas. Os melhores valores de VPL ocorrem quando o cenário gerado permite o controle da válvula três por mais tempo.

### 5.3.1.3 Discussões

Através do resultado alcançado nesse teste, que tem por objetivo apoiar a decisão pelo uso ou não de poços inteligentes em projetos de explotação, pode-se perceber que o uso de poços inteligentes no reservatório em questão é vantajoso mesmo considerando-se a possibilidade de falha nas válvulas. Quando não se considera a possibilidade de substituir a válvula que falhou por uma nova, não se tem o gasto da substituição, porém a possibilidade do controle

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

de uma determinada completação por mais tempo fica prejudicada. A não substituição da válvula, também limita os cenários de falhas, já que após a ocorrência da primeira falha a válvula é mantida nesse estado, ignorando o cenário gerado a partir desse momento.

### 5.3.2 Análise com reparação de válvula

Nesse estudo de caso, será avaliado o modelo de otimização sob incerteza de falha com reparação de válvula. Nesse modelo a válvula é considerada inoperante, e mantida totalmente aberta, somente no intervalo de tempo onde ocorrer a falha. No intervalo de tempo seguinte ao que ocorreu a falha, considera-se que a válvula é substituída por uma nova. Caso ocorra uma falha no último intervalo, a válvula não será mais substituída e se manterá como falha nesse último intervalo. Isso pode ser visto no algoritmo, modelado para tese, descrito na seção 4.3.4.

#### 5.3.2.1 Função de Avaliação

A função de avaliação ocorre da mesma forma da relembrada na seção 5.3.1.2 deste capítulo. Porém, o cálculo do VPL realizado para este modelo, que considera a substituição de válvulas falhas, considera o custo da válvula para todos os tempos onde ocorreu a substituição desta. O cálculo do VPL é feito, exatamente, conforme descrito na seção 4.2.1. Os valores dos parâmetros utilizados no cálculo do VPL são os mesmos descritos na tabela 1.

#### 5.3.2.2 Apresentação dos Resultados

A seguir, é apresentado o teste realizado com o algoritmo de Otimização de Controle de Válvulas em Poços Inteligentes sob Incertezas Técnicas, com reposição de válvulas. Também nesse teste optou-se pelo uso do reservatório sintético. A alternativa de poços utilizada aqui, é a mesma utilizada no teste do modelo sem reposição de válvula, descrita na seção 5.3.1.3.

Conforme explicação realizada na seção 5.3.1.3, também se escolheu utilizar válvulas de abertura contínua variando o índice de injetividade (*FF) do poço inteligente. Mais uma vez, utilizou-se um período total de simulação de 20 anos, com o controle das válvulas sendo realizado a cada 2 anos.

As características e parâmetros da função de distribuição Weibull, são as mesmas do teste anterior e encontram-se no Apêndice A.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

Também foram feitas 600 simulações Monte Carlo, sendo 200 obtidas de uma seqüência pseudo aleatória e 400 de uma seqüência quase Monte Carlo de Sobol. Esses testes foram rodados utilizando processamento paralelo em 20 máquinas, AMD ATHLON XP 2600. O processamento paralelo foi implementado conforme pseudocódigo mostrado na Figura 7 do capítulo 3. O tempo médio de uma simulação é de 4 segundos.

A tabela 31 a seguir apresenta os valores dos parâmetros do algoritmo genético utilizado nesse teste, que são os mesmos utilizados no teste anterior.

| **Parâmetros do AG** | **Valor** |
|---|---|
| Número de gerações | 100 |
| Número de indivíduos | 65 |
| Número de genes | 10 |
| Número de rodadas | 1 |
| *Steady-State* | 0.4 |
| Taxa de *crossover* inicial | 0.65 |
| Taxa de mutação inicial | 0.08 |
| Total de Simulações | 3.900.000 |
| Tempo de Processamento | 9 dias |

Tabela 31. Parâmetros do AG

A tabela 32 mostra os resultados alcançados para o caso base e o caso controlado, bem como o desvio padrão dos VPL's otimizados para cada cenário. O resultado apresentado para o caso controlado representa a média dos VPL's otimizados para cada cenário gerado. O aumento do VPL no caso controlado indica, novamente, a viabilidade do uso de poços inteligentes nesse reservatório, mesmo levando em consideração a possibilidade de ocorrência de falhas, e o gasto com a substituição da válvula que falhou.

| Caso | Base | Controlado | Aumento % | Desvio Padrão (σ) |
|---|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 128.411.174,47 | 133.244.939,04 | 3,8% | 258.651,7 |

Tabela 32. Resultados teste sob incerteza de falha com reposição de válvula

A figura 65 mostra o histograma dos VPL's otimizados encontrados para os cenários gerados nas simulações Monte Carlo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

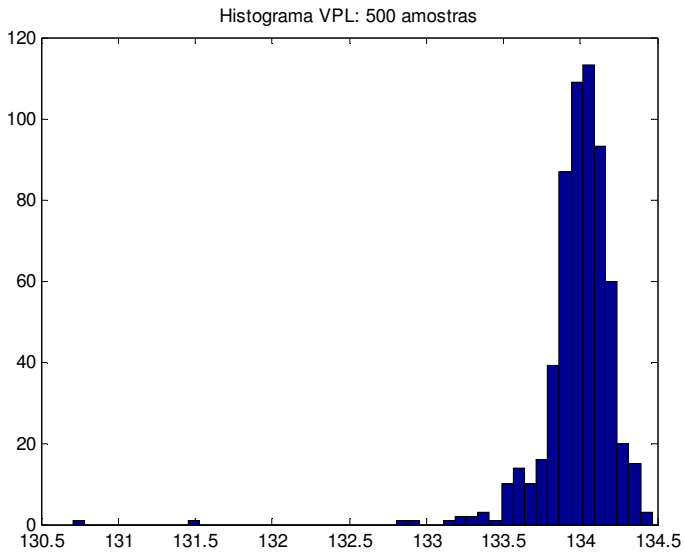


Figura 65. Histograma VPL's – Incerteza Técnica com substituição de válvulas

Para melhor entender a ocorrência de VPL's no histograma da figura 65, fez-se novamente uma análise dos cenários de falhas gerados nas iterações Monte Carlo. Percebe-se, outra vez, que os VPL's mais baixos ocorrem quando a válvula 3 passa mais tempo na condição de falha, sem poder ser controlada. Como nesse estudo existe a possibilidade de substituição de uma válvula que falhou por uma nova, na maior parte dos cenários as válvulas possuem períodos de atividade maiores, sem falha e podendo ser controlada. Consegue-se então, uma maior incidência de bons VPL's, mesmo considerando-se o valor do custo da válvula a cada substituição.

### 5.3.2.3 Discussões

Também esse modelo, tem por objetivo apoiar a decisão pelo uso ou não de poços inteligentes em projetos de explotação. Novamente, constata-se que o uso de poços inteligentes no reservatório em questão é vantajoso mesmo considerando-se a possibilidade de falha nas válvulas e o gasto com a substituição da mesma. Quando se considera a possibilidade de substituir a válvula que falhou por uma nova, o tempo de controle de uma determinada completação aumenta e garante melhores VPL's. Isso pode ser observado comparando-se o teste sem substituição de válvulas, com o teste com substituição de válvulas, onde o segundo consegue melhores resultados (conforme tabela 33 abaixo).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

| Caso | Base | Aumento % Controlado sem substituição | Aumento % Controlado com substituição |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 128.411.174,47 | 2,3% | 3,8% |

Tabela 33. Comparação Resultados Modelo sob Incerteza Técnica de Falha

## 5.4 Otimização de Controle de Válvulas em Poços Inteligentes sob incerteza Geológica

Nesse estudo de caso avalia-se os resultados obtidos com o modelo de otimização da operação das válvulas sob incerteza geológica. Conforme descrito na seção 4, as soluções geradas por esse módulo são simuladas em três cenários geológicos do reservatório em questão: melhor, mais provável e pior. O simulador gera as curvas de produção da solução proposta para cada um dos três cenário. O VPL de cada cenário é, então, calculado e em seguida calcula-se o VPL médio da solução. Ao final da otimização é obtida uma solução que, na média, representa a melhor operação das válvulas para os três cenários.

### 5.4.1 Função de Avaliação

A avaliação ocorre da mesma forma que as anteriores, sendo que, o simulador fornece o perfil de produção para cada configuração, gerada pelo AG, nos três cenários geológicos (pior, melhor e mais provável) que representam o reservatório. A partir do perfil obtido, para cada cenário geológico, calcula-se o VPL e em seguida a média dos VPL's.

O cálculo do VPL é feito conforme descrito na seção 4.2.1, sendo que na equação 6, que descreve o cálculo do custo operacional, o valor do custo da válvula não é considerado, pois incertezas técnicas de falha não são consideradas aqui, logo não existe a possibilidade de substituição de uma válvula. Os valores dos parâmetros utilizados no cálculo do VPL são os mesmos descritos na tabela 1.

### 5.4.2 Apresentação dos Resultados

A seguir, serão apresentados os testes realizados com o algoritmo de Otimização de Controle de Válvulas em Poços Inteligentes sob Incerteza Geológica.

O reservatório utilizado nesses testes foi o com Aqüífero, pois somente para esse reservatório foram disponibilizados cenários geológicos. As

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

características desse reservatório estão descritas na seção 5.1.1. O parâmetro de incerteza inserido foi a continuidade das camadas de folhelhos, onde:

- Cenário 1: Pouca continuidade dos folhelhos entre camadas;
- Cenário 2: Média continuidade dos folhelhos entre camadas;
- Cenário 3: Folhelhos contínuos;

A alternativa de poços utilizada nos testes realizados nesse reservatório é a mesma descrita na figura 55, a qual é composta de quatro poços produtores e quatro poços injetores inteligentes. O mesmo número de válvulas foi utilizado, vinte e quatro, considerando uma válvula em cada completação dos poços injetores.

As válvulas utilizadas foram, novamente, as do tipo abertura contínua variando o índice de injetividade (*FF) do poço inteligente. O tempo total de simulação é também de 20 anos, com possibilidade de controle a cada 2 anos.

Os testes desta seção foram rodados em uma máquina AMD ATHLON XP 3500. O tempo médio de simulação em cada cenário é de 29 segundos.

A tabela 34 a seguir mostra as principais características que diferem os dois testes realizados nessa seção.

| Testes | Tipo de Válvula | Semente Inicial |
|---|---|---|
| Teste 11 | Abertura Contínua (FF) | não |
| Teste 12 | Abertura Contínua (FF) | Melhor indivíduo do teste 11 |

Tabela 34. Principais características dos testes com incerteza geológica.

A tabela 35 a seguir possui os valores dos parâmetros do algoritmo genético utilizado nos testes dessa seção.

| Parâmetros do AG | Teste 11 | Teste 12 |
|---|---|---|
| Número de gerações | 80 | 50 |
| Número de indivíduos | 120 | 65 |
| Número de genes | 10 | 10 |
| Número de rodadas | 1 | 1 |
| *Steady-State* | 0.4 | 0.4 |
| Taxa de *crossover* inicial | 0.65 | 0.65 |
| Taxa de mutação inicial | 0.08 | 0.08 |
| Total de Simulações | 28.800 | 9.750 |
| Tempo de Processamento | 10 dias | 3,5 dias |

Tabela 35. Parâmetros do AG

## Teste 11

A tabela 36 mostra o resultado alcançado pela solução otimizada em cada cenário, o valor médio da solução e o desvio padrão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

| Caso | VPL | Óleo Acm ($m^3$) | Água Acum ($m^3$) |
|---|---|---|---|
| Controlado Cenário 1 | 1.381.156.025,00 | 1.694.840,00 | 3.565.030,00 |
| Controlado Cenário 2 | 1.418.363.304,59 | 1.759.200,00 | 3.497.500,00 |
| Controlado Cenário 3 | 1.427.739.847,92 | 1.780.800,00 | 3.388.530,00 |
| Controlado Médio (μ) | 1.409.086.392,51 | 1.744.946,67 | 3.483.686,67 |
| Desvio Padrão (σ) | 20.117.305,37 | 36.511,62 | 72.714,82 |

Tabela 36. Resultado alcançado pela solução otimizada – teste 11

As tabelas 37, 38, e 39 mostram, respectivamente, a comparação entre o caso base do cenário 1, cenário 2 e cenário 3 com o caso controlado médio.

| Cenário 1 | Caso Base 1 | Controlado Médio | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 1.261.088.749,27 | 1.409.086.392,51 | 11,7% |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 1.535.300,00 | 1.744.946,67 | 13,65 % |
| Água Acumulado ($m^3$) | 3.725.480,00 | 3.483.686,67 | -6,5 % |

Tabela 37. Resultados alcançados (Cenário 1 x Controlado Médio) – teste 11

| Cenário 2 | Caso Base 2 | Controlado Médio | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 1.331.071.666,79 | 1.409.086.392,51 | 5,9% |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 1.635.870,00 | 1.744.946,67 | 6,68 % |
| Água Acumulado ($m^3$) | 3.624.690,00 | 3.483.686,67 | -3,9 % |

Tabela 38. Resultados alcançados (Cenário 2 x Controlado Médio) – teste 11

| Cenário 3 | Caso Base 3 | Controlado Médio | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 1.349.161.167,11 | 1.409.086.392,51 | 4,4% |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 1.659.670,00 | 1.744.946,67 | 5,14 % |
| Água Acumulado ($m^3$) | 3.600.720,00 | 3.483.686,67 | -3,25 % |

Tabela 39. Resultados alcançados (Cenário 3 x Controlado Médio) – teste 11

As tabelas acima demonstram que o caso otimizado médio alcançou melhores valores de VPL comparado aos casos bases de cada cenário geológico.

A figura 66 mostra as curvas *Score*, *Online* e *OffLine* do algoritmo genético. Através, principalmente, das curvas *Score* e *OnLine* pode-se perceber que o algoritmo genético ainda não convergiu, isso devido a grande inclinação dessas curvas. Essas curvas indicam então a necessidade de um numero maior de gerações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

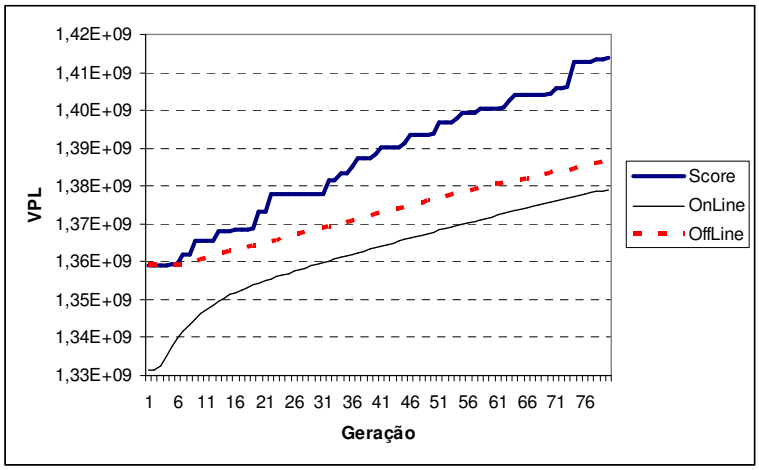


Figura 66. Curvas Algoritmo Genético Teste 11

## Teste 12

A tabela 40 mostra o resultado alcançado pela solução otimizada em cada cenário, o valor médio da solução e o desvio padrão.

| Caso | VPL | Óleo Acm ($m^3$) | Água Acum ($m^3$) |
|---|---|---|---|
| Controlado Cenário 1 | 1.392.526.153,62 | 1.753.800,00 | 4.093.720,00 |
| Controlado Cenário 2 | 1.432.599.355,66 | 1.788.890,00 | 3.465.630,00 |
| Controlado Cenário 3 | 1.439.493.012,95 | 1.801.110,00 | 3.315.990,00 |
| Controlado Médio (μ) | 1.421.539.507,41 | 1.781.266,67 | 3.625.113,33 |
| Desvio Padrão (σ) | 20.707.674,12 | 20.052,35 | 336.939,35 |

Tabela 40. Resultado alcançado pela solução otimizada – teste 12

As tabelas 41, 42, e 43 mostram, respectivamente, a comparação entre o caso base do cenário 1, cenário 2 e cenário 3 com o caso controlado médio.

| Cenário 1 | Caso Base 1 | Controlado Médio | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 1.261.088.749,27 | 1.421.539.507,41 | 12,72 % |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 1.535.300,00 | 1.781.266,67 | 16 % |
| Água Acumulado ($m^3$) | 3.725.480,00 | 3.625.113,33 | -2,69 % |

Tabela 41. Resultados alcançados (Cenário 1 x Controlado Médio) – teste 12

| Cenário 2 | Caso Base 2 | Controlado Médio | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 1.331.071.666,79 | 1.421.539.507,41 | 6,79 % |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 1.635.870,00 | 1.781.266,67 | 8,89 % |
| Água Acumulado ($m^3$) | 3.624.690,00 | 3.625.113,33 | 0,01 % |

Tabela 42. Resultados alcançados (Cenário 2 x Controlado Médio) – teste 12

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA

| Cenário 3 | Caso Base 3 | Controlado Médio | Aumento % |
|---|---|---|---|
| VPL (US$) | 1.349.161.167,11 | 1.421.539.507,41 | 5,36 % |
| Óleo Acumulado ($m^3$) | 1.659.670,00 | 1.781.266,67 | 7,32 % |
| Água Acumulado ($m^3$) | 3.600.720,00 | 3.625.113,33 | 0,67 % |

Tabela 43. Resultados alcançados (Cenário 3 x Controlado Médio) – teste12

Novamente o caso otimizado médio alcançou melhores valores de VPL comparado aos casos bases de cada cenário geológico.

A figura 67 mostra as curvas *Score*, *OnLine* e *OffLine*. Com relação ao teste anterior, que serviu de semente inicial, nota-se que a inclinação da curva *Score* foi bem menor, iniciando uma convergência da população.

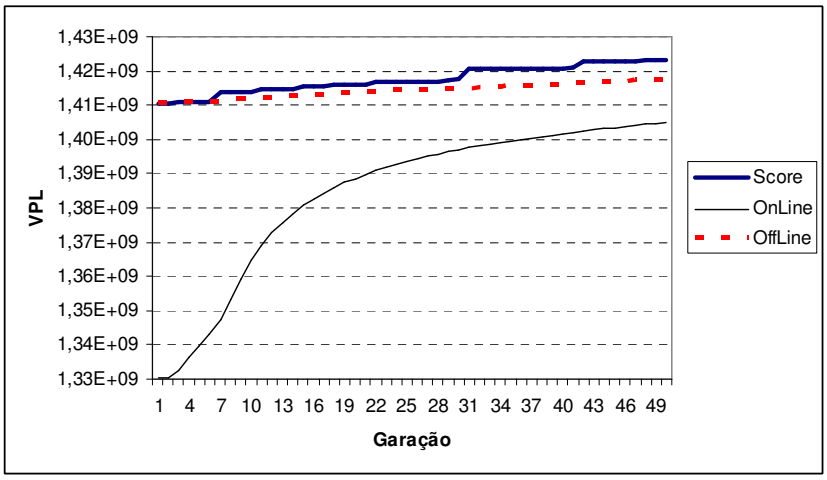


Figura 67. Curvas Algoritmo Genético Teste 12

### 5.4.3 Discussões

O objetivo desta otimização é encontrar uma configuração de válvulas que, na média, seja a melhor configuração para os três cenários geológicos (melhor, pior e mais provável) do reservatório em questão. O algoritmo otimizador consegue chegar a uma configuração que aumenta a produção de óleo, diminui a produção de água e, conseqüentemente, aumenta o VPL, para os três cenários. Analisando a curva Score do algoritmo genético, percebe-se que esse ainda não convergiu, indicando a necessidade de um maior número de gerações para se chegar a uma convergência, porém, como critério de análise de decisão, o resultado encontrado sugere o uso de poços inteligentes nesse reservatório, mesmo levando-se em consideração as incertezas geológicas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310435/CA