

JOÃO VICTOR GOIS SILVA

Otimização da completção inteligente aplicada a reservatórios carbonáticos

Santos
2019

JOÃO VICTOR GOIS SILVA

Otimização da completção inteligente aplicada a reservatórios carbonáticos

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Petróleo do curso de graduação do
departamento de Engenharia de Minas e
de Petróleo da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto
Sampaio Pinto

Santos

2019

JOÃO VICTOR GOIS SILVA

Otimização da completção inteligente aplicada a reservatórios carbonáticos

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Petróleo do curso de graduação do
departamento de Engenharia de Minas e
de Petróleo da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Área de Concentração: Simulação de
reservatórios

Orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto
Sampaio Pinto

Santos

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

SILVA, JOÃO VICTOR GOIS

Otimização da completação inteligente aplicada a reservatórios carbonáticos / J. V. G. SILVA – São Paulo, 2019.
53 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Simulação de reservatórios 2.Completação inteligente 3.Otimização do corte de água 4.Engenharia de Reservatórios I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, aos meus amados pais Francisco e Claudia, ao meu irmão Gabriel e a minha querida avó Angélica.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a toda minha família nesse momento. Aos meus pais Francisco e Claudia, por todo o incentivo e apoio incondicional na realização deste sonho. Ao meu irmão Gabriel, pelo companheirismo em todas as horas. À minha querida vó Angélica, por todo seu amor e ternura. A todos os meus tios, e em especial, às minhas madrinhas Ana e Angelita e ao meu padrinho Henrique. E por fim, aos meus primos: Cesinha, Charles, André, Vanessa, Erick e todos os outros por quem tenho imenso carinho.

Gostaria de agradecer a todos os meus amigos que fiz durante essa caminhada na faculdade e que me ajudaram em vários momentos, em especial: Thales, Bruno Oliveira, Arthur, Anderson, Fernando, Rafael Passos, Fellipe Miorim, Lívia, Ana e Carol. Aos meus amigos de Aracaju: Thauan, Wille, Neviton, Victoria, Ludmilla, Lucas e todos os outros que mantiveram esse laço de amizade mesmo com a distância.

Gostaria de agradecer a minha namorada Daiane por todo o apoio, carinho e amor dado durante boa parte da minha graduação.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Marcio Augusto Sampaio Pinto por toda ajuda e incentivo dados durante a realização deste trabalho de formatura. E também a Escola Politécnica da USP, em especial ao LASG, pela estrutura necessária para a realização do trabalho.

Por fim, agradeço a Deus que me deu toda a força necessária para minha vitória e me ilumina sempre em todos os desafios.

RESUMO

A otimização da produção de óleo em um campo pode maximizar o lucro obtido, por isso torna-se essencial escolher a melhor estratégia de produção. Num cenário com altas vazões de produção diária de óleo como o do Pré-Sal, pequenas alterações nessa estratégia podem resultar em significativas mudanças no Valor Líquido Presente (VPL) de um campo. Tendo isso em vista, o presente trabalho busca mitigar um dos problemas que podem reduzir o lucro obtido: a excessiva produção de água nos poços produtores. Como uma das soluções, surge a completação inteligente, que permite o controle de parâmetros de produção, como pressão e produção de água, em tempo real através de um sistema composto por válvulas e sensores instalados no poço e controlados na superfície. Através de simulações de reservatório, foi realizado um estudo de caso envolvendo uma configuração *five-spot*, com 4 poços injetores e 1 produtor construído no CERENA-I, um modelo sintético carbonático de reservatório com características semelhantes ao Pré-Sal. Neste estudo, instalou-se um sistema de completação inteligente no poço produtor buscando a melhor configuração entre as válvulas inteligentes, ou seja, otimizando o número, o posicionamento e, principalmente, o controle destas válvulas durante o período de produção, realizado através da definição do corte de água limite ($WCUT_{Limit}$, do inglês, Water Cut Limit). Assim, esperou-se reduzir a produção de água em cada zona do reservatório, prolongar a vida útil do poço evitando o fechamento precoce do mesmo e reduzir os custos operacionais derivados do processamento de água na plataforma. Deste modo, foi possível justificar os investimentos adicionais em completação inteligente e, principalmente, maximizar o VPL obtido na produção do campo, que é a função objetivo para se construir a melhor estratégia de produção. Os resultados do estudo mostraram-se satisfatórios para os controles reativo e proativo, reduzindo a quantidade de água produzida em 61.1% e 39.15%, respectivamente e, ao mesmo tempo, aumentando a produção de óleo em 0.69% e 0.86%, para os respectivos controles.

Palavras-Chave: Simulação de reservatórios. Completção inteligente. Otimização do corte de água.

ABSTRACT

Optimizing the production of oil in a field can maximize the profit obtained, so it is essential to choose the best production strategy. In a scenario with high daily oil production rates such as the Pre-Salt, small changes in this strategy can result in significant changes in the Net Present Value (NPV) of a field. In this context, the present work seeks to mitigate one of the problems that can reduce the profit obtained: the excessive production of water in the producing wells. As a solution, there is the intelligent completion, which allows the control of production parameters, such as pressure and water production, in real time through a system composed of valves and sensors installed in the well and controlled on the surface. Through computer simulations, a case study involving a *Five-spot* with four injector wells and a producer constructed in the CERENA-I, a synthetic carbonate model of reservoir with characteristics like the Pre-Salt was done. In this study, an intelligent completion system was installed in the production well, seeking the best configuration among the intelligent valves, that is, optimizing the number, positioning and, especially, the control of this valves during the production time, realized through the Water Cut Limit ($WCUT_{Limit}$) definition. Thus, it was expected to reduce the production of water in each zone of the reservoir, to prolong the useful life of the well, avoiding the early closing of the well and to reduce the operational costs derived from the processing of water in the platform. In this way, it was possible to justify the additional investments in intelligent completion and, mainly, to maximize the NPV obtained in field production, which is the objective function to build the best production strategy. The study results shown itself satisfactory for the reactive and proactive controls, reducing the among of produced water in 61.1% and 39.15%, respectively, and, in the same time, increasing the oil production in 0.69% and 0.86%, for the respective controls.

Keywords: Simulation of reservoirs. Smart completion. Optimization of water cut.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: VPL esperado com e sem investimento em Completação Inteligente | 2 |
| Figura 2: Polígono do Pré-sal..... | 3 |
| Figura 3: Estruturas da Completação Convencional e da Completação Inteligente.... | 6 |
| Figura 4: Complexidade e demanda computacional devido ao tipo de válvula. | 6 |
| Figura 5: Complexidade e demanda computacional devido à forma de controle. | 7 |
| Figura 6: Processo de cruzamento com um ponto de corte | 13 |
| Figura 7: Processo de Mutação..... | 13 |
| Figura 8: Fluxograma de otimização utilizado pelos Algoritmos Genéticos..... | 14 |
| Figura 9: Fluxograma resumido da metodologia desenvolvida | 15 |
| Figura 10: Código de representação da completação inteligente no poço produtor no CMG..... | 16 |
| Figura 11: Esquema ilustrativo da representação da completação inteligente no poço produtor..... | 17 |
| Figura 12: Otimização do número de válvulas inteligentes | 18 |
| Figura 13: Esquema ilustrativo para o processo de otimização do controle de válvulas | 19 |
| Figura 14: Vista 3D da distribuição de porosidade no modelo CERENA-I original.... | 23 |
| Figura 15: Vista Geral do modelo, configuração dos poços e saturação inicial de óleo | 24 |
| Figura 16: Permeabilidade do Modelo..... | 25 |
| Figura 17: Porosidade do Modelo | 26 |
| Figura 18: Gráfico de otimização do VPL em função do WCUT..... | 30 |
| Figura 19: Comparativo entre a Configuração de 3 válvulas (controle reativo) e o caso convencional (Base)..... | 36 |
| Figura 20: Configuração de Abertura/Fechamento das 3 válvulas ICVs em uso | 37 |
| Figura 21: Evolução do VPL de acordo as simulações comandadas pelo algoritmo | 39 |
| Figura 22: Gráfico comparativo entre as Vazões de Produção de Óleo..... | 40 |
| Figura 23: Gráfico comparativo entre as Vazões de Produção de Água..... | 40 |
| Figura 24: Configuração de Abertura/Fechamento das ICVs no controle proativo.... | 41 |
| Figura 25: Mapa de Saturação de Água e configuração de abertura das camadas do poço | 42 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.2 Cenário atual e motivações | 2 |
| 1.3 Objetivo..... | 3 |
| 1.4 Escopo do trabalho | 4 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA..... | 5 |
| 2.1 Completação Inteligente | 5 |
| 2.2 Tipos de Operação de Válvulas | 6 |
| 2.3 Tipos de Controle de Válvulas | 7 |
| 2.4 Otimização da Completação Inteligente | 7 |
| 2.5 Simulação numérica de escoamento em reservatórios | 11 |
| 2.5 Métodos de Otimização – Algoritmos Genéticos/Evolucionários | 12 |
| 3 METODOLOGIA..... | 15 |
| 3.1 Representação das válvulas de completção inteligente no CMG | 15 |
| 3.2 Otimização do Número e Posicionamento das Válvulas | 17 |
| 3.3 Otimização do controle de válvulas | 18 |
| 3.4 Avaliação econômica determinística..... | 19 |
| 4 ESTUDO DE CASO | 23 |
| 4.1 Modelo CERENA-I..... | 23 |
| 4.2 Pacote de <i>softwares</i> de simulação – CMG | 26 |
| 4.3 Definição dos parâmetros de operação de poço | 27 |
| 4.4 Definição do cenário econômico determinístico..... | 28 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 30 |
| 5.1 Otimização do Número e Posicionamento das Válvulas | 30 |
| 5.2 Otimização do controle de válvulas | 37 |
| 5 CONCLUSÕES | 43 |
| REFERÊNCIAS | 45 |
| ANEXO A – Artigo Síntese | 48 |

1 INTRODUÇÃO

A escolha da melhor estratégia de produção para determinado campo pode melhorar o desempenho do reservatório, maximizando a recuperação de hidrocarbonetos enquanto considera os objetivos e as limitações deste campo, sendo necessária uma constante interação entre o modelo geológico, análise técnico-econômica e configurações operacionais, ou seja, com base na simulação de reservatórios que hoje é o recurso mais utilizado para obter-se previsões de produção e definir essa estratégia. O desenvolvimento do campo é pautado para resolver alguns desafios: aumento da recuperação de óleo, redução da produção de água, diminuição do número de intervenções no poço e, o mais importante, a maximização do VPL (Valor Presente Líquido) do campo.

Para atingir os desafios citados acima no desenvolvimento de um campo, novos conceitos e tecnologias estão sendo estudados. Entre estas, uma das mais promissoras é a “Completação Inteligente”, tecnologia que possibilita o monitoramento e o controle da produção de hidrocarbonetos por meio de um sistema que permite que a abertura das válvulas do poço seja ajustada e, além disso, que os dados em tempo real sejam adquiridos sem qualquer intervenção de poço.

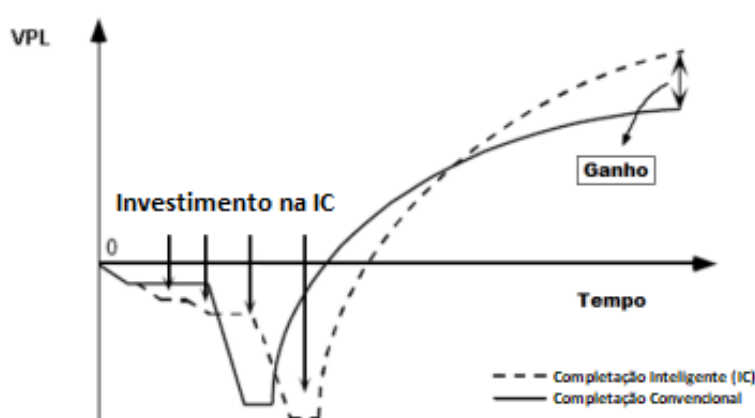
De acordo com Silva (2009), a completção inteligente consiste na incorporação de sensores de fundo de poço permanentes e válvulas de controle de vazão controladas por superfície, permitindo monitoramento e controle. Esse sistema possui algumas vantagens de caráter estratégico, tais como:

- Monitoramento zonal em tempo real de pressões e temperaturas;
- A produção de múltiplas zonas, controladas em superfície, visando otimizar a produção e o gerenciamento do reservatório;
- Redução da produção de água ou gás indesejável;
- Aumento da recuperação e prolongamento da vida econômica do poço;
- Possibilidade da realização de testes de produção de zonas individuais sem intervenções e com interrupção de produção mínima;
- Controle da distribuição da injeção de água ou gás nas diferentes camadas do reservatório.

Mesmo com o grande número de vantagens apresentadas, por ser uma tecnologia recente e com custo elevado quando comparada ao método convencional,

a completção inteligente ainda demanda estudos que busquem encontrar o seu uso otimizado, aumentando ao máximo possível a lucratividade do campo e justificando o maior investimento inicial quando comparado à completção convencional, como ilustra a Figura 1. Um outro desafio a ser enfrentado e que também justifica a busca por um uso otimizado das válvulas é o risco associado ao mal funcionamento ou falha destas, ocasionados pelas condições de alta pressão e temperatura do reservatório. No entanto, nestes últimos, o risco vem sendo gradualmente reduzido (Silva, 2009).

Figura 1: VPL esperado com e sem investimento em Completção Inteligente



Fonte: PINTO, 2013.

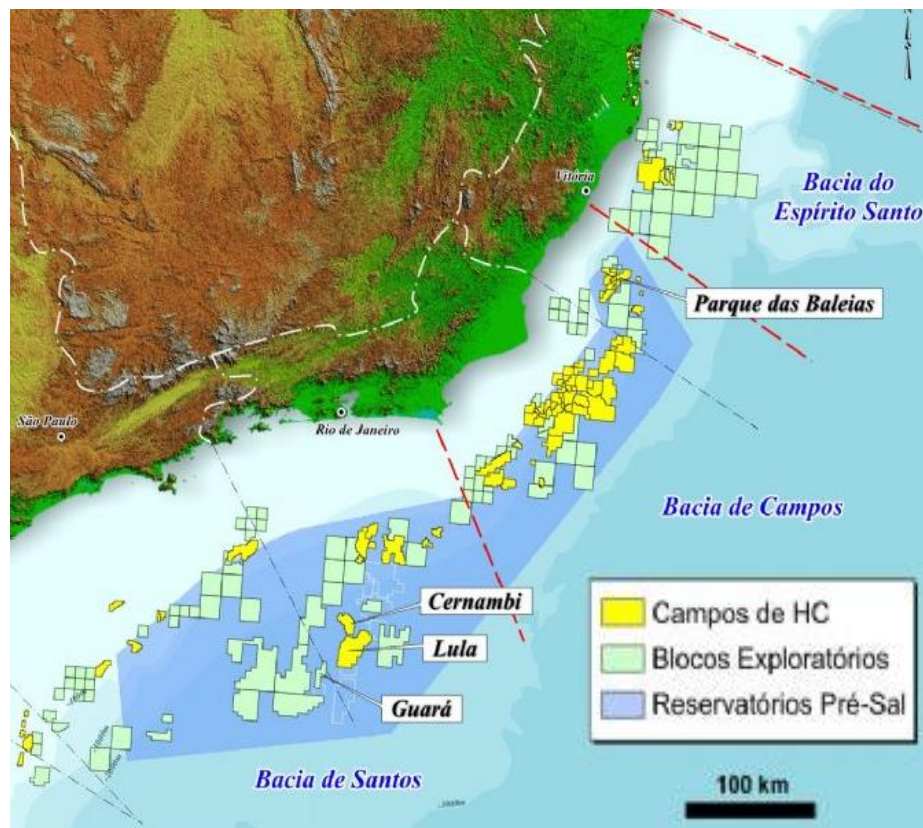
1.2 Cenário atual e motivações

No panorama brasileiro sabe-se que o gerenciamento da produção em águas profundas e ultra profundas é muito mais complexo que em águas rasas, e é, justamente onde os principais projetos estão concentrados, na região do Pré-Sal. Para ilustrar, em campos em águas ultra profundas, os custos de mover uma sonda para fazer essas intervenções são muito mais altos se comparado à campos *onshore* ou de águas rasas. Portanto, nesse caso, é mais viável realizar as operações remotamente a partir da superfície, utilizando a completção inteligente.

Além disso, segundo Moreira (2007) os reservatórios presentes na área do Pré-Sal são predominantemente carbonáticos, diferentemente dos demais reservatórios brasileiros, como os da Bacia de Campos, onde são de característica siliciclásticos. Logo, novos desafios operacionais devidos a essa diferença estão presentes, por

exemplo, a produção em reservatórios heterogêneos e compartimentados em múltiplas zonas. Na Figura 2 podemos observar a área de exploração e produção do Pré-Sal.

Figura 2: Polígono do Pré-sal



Fonte: Pré-Sal Petróleo S.A. (PPSA).

É a partir desse cenário desafiador, que o tema deste trabalho está pautado: na busca da otimização e viabilidade da aplicação da completação inteligente em reservatórios carbonáticos.

1.3 Objetivo

Esse trabalho tem o intuito de contribuir através do desenvolvimento de uma metodologia que otimize o controle de válvulas na completação inteligente em um modelo reduzido de reservatório carbonático com 4 poços injetores e 1 produtor, visando a redução da produção de água e o aumento da produção de óleo. Deste modo, maximizando o VPL do campo.

1.4 Escopo do trabalho

Antes de se avançar a etapa seguinte, é importante mostrar como será feita a organização deste trabalho para fins de melhor entendimento:

- No Capítulo 2, será feita uma revisão bibliográfica específica, mostrando e comparando trabalhos anteriores de diferentes autores com o objetivo de verificar o estado da arte do tema do presente trabalho e justificar o objetivo já descrito;
- No Capítulo 3, serão descritos todos os recursos e materiais utilizados e, além disso, será detalhada toda a metodologia que foi desenvolvida para o estudo;
- No Capítulo 4, serão apresentados os resultados obtidos com o processo de simulação;
- No Capítulo 5, será feita uma discussão crítica sobre todos os resultados obtidos anteriormente e os respectivos significados;
- No Capítulo 6, o trabalho será finalizado apresentando uma síntese da discussão dos resultados, e mostrando possíveis sucessos e insucessos a serem obtidos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A seguir é apresentado um levantamento da literatura afim de verificar o estado da arte sobre o que já foi publicado na área e que serviu de base para a investigação do trabalho proposto.

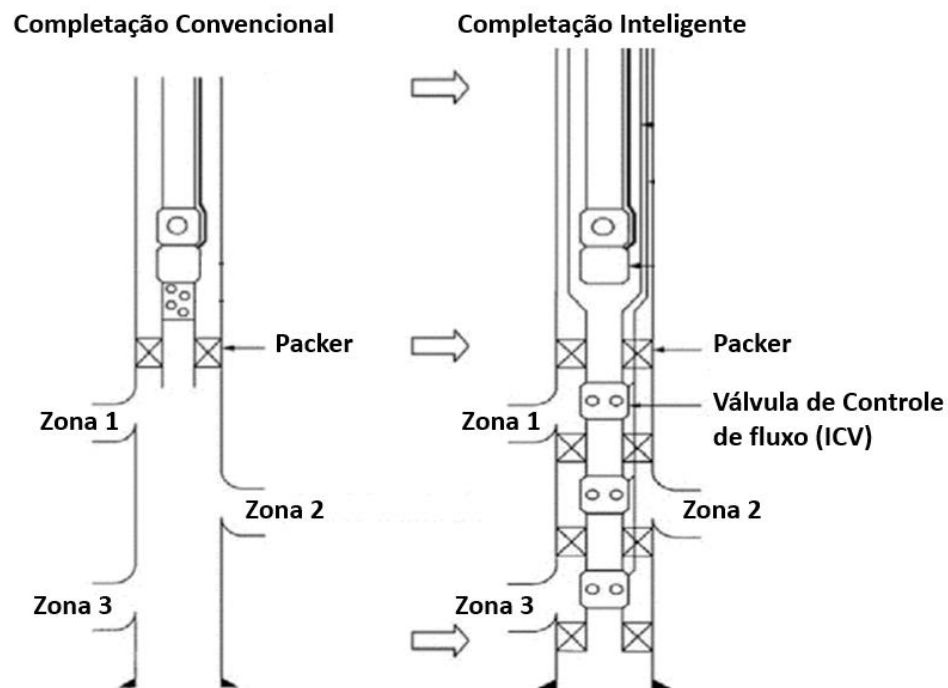
2.1 Completação Inteligente

Segundo Guo et al. (2008), um sistema de Completação Inteligente permite ao operador monitorar e controlar um poço produtor ou injetor de maneira remota a partir da superfície, esse controle é feito através das chamadas válvulas de controle de fluxo. O diferencial desse tipo de completção é a habilidade de resposta rápida a mudanças no desempenho do reservatório sem necessidade de intervenção, desse modo, podendo otimizar a produção e o gerenciamento do reservatório. A composição de um sistema de poço inteligente pode ser descrita da seguinte forma:

- Válvulas de controle de fluxo;
- Sensores de pressão e temperatura no fundo do poço;
- Ferramentas de isolamento de zonas de completção (Packers);
- Sistemas de aquisição de dados e controle em superfície;
- Cabos de comunicação e alimentação.

A principal característica da completção inteligente para os estudos de otimização de produção é definida em Renpu (2011) da seguinte maneira: reservatórios fragmentados com múltiplas zonas podem ser seletivamente produzidos, e o modo de trabalho ótimo pode ser alcançado com base nos dados obtidos e nos parâmetros selecionados para cada camada do poço; num poço de produção, por exemplo, a válvula com alto valor de Corte de Água Wcut (do inglês, Water Cut) pode ser instantaneamente fechada, reduzindo a produção de água e simultaneamente aumentando a produção de óleo do poço. Na Figura 3, o esquema simplificado de organização da completção inteligente no interior do poço pode ser visto em comparação a completção convencional.

Figura 3: Estruturas da Completação Convencional e da Completação Inteligente

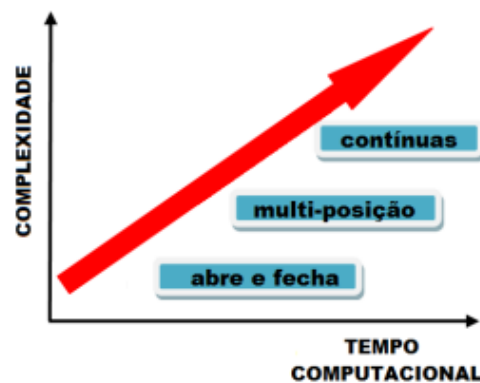


Fonte: RENPU, 2011 (ADAPTADA)

2.2 Tipos de Operação de Válvulas

Segundo Pinto (2013) existem 3 categorias de válvulas de acordo com o tipo de operação: válvulas do tipo abre-fecha (binário), válvulas de posicionamento discreto e válvulas de abertura contínua. A diferença entre os tipos de válvula pode interferir diretamente no gasto computacional da simulação, o que pode ser visto na Figura 4.

Figura 4: Complexidade e demanda computacional devido ao tipo de válvula.



Fonte: PINTO, 2013

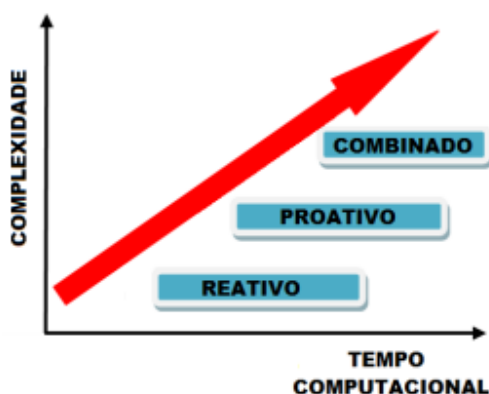
2.3 Tipos de Controle de Válvulas

De acordo com Silva (2009), o controle de válvulas pode ser classificado de três modos a depender do seu acionamento:

- Controle Proativo: Tem como objetivo trabalhar de maneira antecipada aos eventos que podem ocorrer no reservatório através de um cronograma de aberturas e fechamentos pré-determinados. Um exemplo de aplicação é o controle das válvulas antecipado evitando uma chegada prematura de água no poço;
- Controle Reativo: Tem como objetivo trabalhar de maneira imediata a ocorrência de evento no reservatório, ou seja, reativa a estes. Um exemplo de aplicação é quando os sensores apontam uma alta produtividade em determinada zona e decide-se, então, fechar a respectiva válvula para privilegiar as demais zonas e aumentar a produção de óleo;
- Controle Combinado: é feito através do uso paralelo dos dois tipos de controle citados acima.

A diferença entre os tipos de controle de válvula pode afetar diretamente o gasto computacional da simulação, o que pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Complexidade e demanda computacional devido à forma de controle.



Fonte: PINTO, 2013

2.4 Otimização da Completação Inteligente

Em Yeten et al. (2002) o foco do trabalho foi o uso de dispositivos de controle de entrada para a otimização do desempenho do poço. Através da completação inteligente, as vazões de entrada para cada válvula podem ser controladas a fim de

maximizar a produção de óleo. A metodologia foi baseada num processo de otimização que utilizou gradientes conjugados em conjunto com um simulador comercial de reservatórios, o qual contém uma modelagem para múltiplas zonas detalhada. Na sequência o algoritmo foi aplicado para dois estudos de caso: no primeiro foi considerado um quarto de um modelo com configuração de poços do tipo *five-spot* dividido em camadas e a produção acumulada de óleo foi otimizada com base na configuração dos dispositivos de controle. Já no segundo caso foi utilizado um poço multilateral, com controle em cada uma das laterais, em um reservatório altamente heterogêneo (depois foi estendido para um cenário de incertezas geoestatísticas). Como resultado do estudo concluiu-se que a otimização da configuração de válvulas deve ser feita para cada um dos períodos de tempos, que para ambos os casos a recuperação pode ser melhorada em até 65% em comparação ao método convencional e que para um cenário com alto grau de incerteza são necessários mais dados antes da análise de decisão.

Antes do estudo de Naus et al. (2006) as operações das válvulas inteligentes eram feitas de maneira, majoritariamente, reativa. Já neste artigo, foi proposto um modelo baseado em uma estratégia com controle proativo como forma de otimizar continuamente a produção. No desenvolvimento do campo, os autores se restringiram a maximizar a produção de óleo em um curto prazo, utilizando uma otimização de fluxo da região do poço e da zona de reservatório próxima. Isso foi possível através de uma metodologia baseada em válvulas de controle de fluxo utilizando variáveis otimizadas por programação linear sequencial SLP (do inglês, Sequential Linear Programming), empregando informações instantâneas para se obter as mudanças de configuração dessas válvulas. Por fim, pode-se concluir que a produção acelerada nem sempre resulta numa maior recuperação final, portanto, para otimizar a produção deve-se ponderar os ganhos da produção de curto prazo (produção acelerada) e de longo prazo (maximização da recuperação).

Emerick e Portella (2007) propuseram em seu trabalho um método de otimização do controle das válvulas de entrada no poço baseado num algoritmo de busca direta. Este apresentou uma vantagem em relação a trabalhos anteriores: o algoritmo permite modelar as válvulas em modo binário (*on/off*) ou em modo de multiposição. A metodologia foi desenvolvida para dois estudos de caso: no primeiro foram utilizados 3 poços horizontais, 2 produtores e 1 injetor de água, o que totaliza 6

dispositivos de controle de entrada. Foram analisados também alguns cenários variando o tipo de válvula, e no segundo caso foram utilizados 9 produtores com válvulas binárias e 6 injetores com válvulas multiposições. O estudo atingiu seu objetivo em demonstrar um método de otimização da completação inteligente aplicado a múltiplas zonas e, além disso, mostrou resultados satisfatórios quando aplicado em dois campos brasileiros para quantificar os benefícios do processo. Foi obtido um incremento de 10% na produção em comparação ao caso base e de 7% em relação ao caso de recompletação.

No trabalho de Almeida et al. (2010) foi apresentada a aplicação de um método de otimização viável de ser executado, realizando a variação contínua da abertura de válvulas. Existem alguns pontos a serem destacados na metodologia: (1) o estudo de caso num modelo sintético de reservatório; (2) apresenta a solução para um possível problema operacional do IMEX (CMG, 2000), o qual não suporta o uso de válvulas de completação inteligentes, apresentando para contornar o problema algumas propriedades na definição de poços produtores e injetores de modo a possibilitar a representação das válvulas de abertura contínua; (3) o processo de otimização foi baseado em algoritmos genéticos. Através dos resultados chegaram à conclusão que os algoritmos genéticos podem ser uma boa ferramenta de apoio para determinar a viabilidade do uso de sistemas de poço inteligente em um dado reservatório, visto que os valores obtidos nos testes demonstram uma uniformidade no avanço da água, o que pode permitir um aumento na produção de óleo e uma diminuição da produção de água, aumentando a eficiência do arrasto da água na recuperação secundária de petróleo.

A falta de uma metodologia consolidada para analisar a aplicabilidade da completação inteligente e a comparação com o método convencional motivaram Sampaio et al. (2012), a realizarem um novo estudo. Neste, foi apresentada uma comparação entre diferentes configurações de poços inteligentes com controle proativo e operação binária (*on/off*). O estudo teve como intuito encontrar, através do uso de algoritmos genéticos, o uso otimizado para cada uma das válvulas, buscando o máximo VPL, ou seja, antes que o fluxo de caixa para a válvula seja negativado, fechando a qualquer momento antes deste evento. Os resultados do estudo mostraram que o uso de poços produtores e injetores inteligentes em conjunto podem aumentar a produtividade, entretanto podem ser pouco vantajosas devido ao alto

investimento. Já utilizando apenas um poço produtor inteligente, com menor investimento, pode-se aumentar suficientemente a recuperação de óleo, fazendo assim o melhor investimento com completação inteligente, neste estudo de caso.

A principal contribuição de Sampaio et al. (2015) foi a criação de uma metodologia para otimizar PIs (poços inteligentes) e PCs (poços convencionais) apenas produtores, com objetivo de comparar apropriadamente os dois tipos, estabelecendo uma estratégia de produção otimizada com os PIs e PCs em um campo de petróleo. Em trabalhos anteriores, eram empregadas válvulas com número e posicionamento arbitrários, provavelmente sendo usadas em uma condição não ótima, o que provavelmente comprometeu as comparações. A metodologia é resumida na aplicação da otimização na simulação de um modelo sintético de reservatório heterogêneo, com 4 produtores horizontais e 4 poços injetores horizontais, com o objetivo de alcançar a configuração ótima no controle das válvulas inteligentes, aumentando a eficiência dos poços injetores e a lucratividade dos poços produtores. Os resultados mostraram que a completação inteligente, para cenários de pouca incerteza aumentaram a recuperação de óleo e o VPL, reduzindo a produção e injeção de água na maioria dos casos. Entretanto, para cenários com alto grau de incerteza, os PIs com qualquer tipo de controle não foram recomendados, sendo necessário mais informações sobre o reservatório para implementação da tecnologia.

Estratégias usando modos de controle proativo ou reativo são frequentemente utilizadas para a otimização da operação das válvulas de controle de fluxo ICVs (do inglês, Inflow Control Valves) nos poços inteligentes. Em Abreu et. al. (2015), foi avaliada uma abordagem híbrida sobre um modelo de reservatório baseado no Campo de Namorado, na Bacia de Campos. Essa proposta considerou a incerteza a respeito do reservatório e a presença de informações de medidas futuras. A metodologia possibilitou uma estratégia prática para a operação atual das válvulas que é adaptável a informação futura, permitindo quantificar o impacto da redução da incerteza a respeito do reservatório. A abordagem híbrida é explicada pelo fato de o controle ser proativo, otimizado em relação ao comportamento da previsão esperada da produção e, ao mesmo tempo reativo, podendo acomodar dados futuros e reagir apropriadamente. O trabalho se desenvolveu em duas etapas de comparação: na primeira, mensurou a importância da presença de informação futura a respeito do reservatório, e na segunda, mensurou o impacto do aumento do número de passos

(divisão do tempo de produção) no processo de simulação. Como resultado, verificou-se que a presença de informação futura reduz o custo computacional e aumenta o VPL obtido à medida que aumenta a eficiência dos controles proativo e reativo, além disso, o aumento do número de passos incrementa consideravelmente o VPL, entretanto, também aumenta o custo computacional com um maior número de simulações necessário.

Por fim, mais recentemente, foram realizados dois trabalhos que aplicaram a otimização da completação inteligente na escala de campo: Abdullayev et. al. (2017), Illamah e Waterhouse (2018). O primeiro estudo teve como objetivo montar uma estrutura de integração efetiva dos dados vindos dos indicadores de desempenho do poço inteligente com o intuito de otimização da recuperação do reservatório. Utilizando uma metodologia de otimização comum a trabalhos anteriores, os resultados desse estudo confirmaram um ganho econômico significativo, com redução de água e aumento da produção de óleo. Já no segundo trabalho, foi descrito um modelo de otimização baseado na configuração da ICV para um campo de produção localizado no Mar do Norte. Um algoritmo de otimização utilizando um padrão de busca dividido em duas etapas iterativas é aplicado ao modelo: a primeira etapa utilizando algoritmos genéticos para a busca por soluções globais e a segunda realizando uma busca local na região do máximo global. Os resultados mostraram um aumento significativo no desempenho do campo, com um consequente ganho na produção total de óleo e na vida útil do reservatório.

2.5 Simulação numérica de escoamento em reservatórios

Segundo Silva (2009), a simulação de reservatórios é de suma importância para a obtenção de previsões de produção do reservatório e futura análise de decisão sobre a estratégia de produção. Isso é possível devido ao uso de modernos simuladores computacionais, como por exemplo, o pacote CMG (Computer Modelling Group Ltda., Calgary, Alberta, Canada) e o Eclipse (Schlumberger Ltda., Henley-on-Thames, Reino Unido). Estes, a partir de parâmetros definidos e dados do reservatório, simulam uma previsão futura.

O processo de simulação, considerado complexo, busca fazer estimativas sobre as variações de pressão e saturação e sobre a vazão dos fluidos presentes no reservatório. Portanto, o *software* busca resolver um conjunto de equações não-

lineares que descrevem o escoamento dos fluidos, como por exemplo: a Equação de Difusividade Hidráulica (EDH). Para isto, se faz necessário um conjunto de hipóteses e condições de contorno, como o modelo *Black-Oil* por exemplo, e a discretização de uma malha para descrever o volume do reservatório.

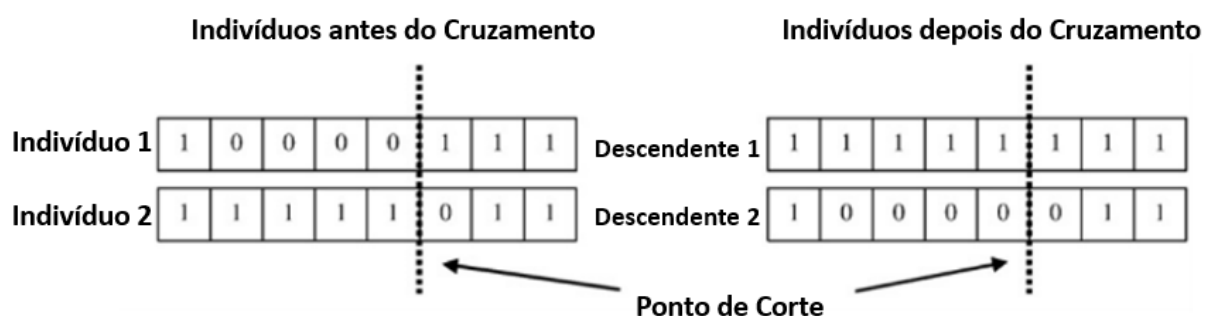
2.5 Métodos de Otimização – Algoritmos Genéticos/Evolucionários

A otimização de problemas não-lineares, complexos e com alto número de parâmetros a ser otimizado, geralmente requer um número extremamente alto de simulações. Assim sendo, em muitas situações é operacionalmente inviável simular todas as combinações entre os parâmetros para buscar aquela com o melhor resultado. A partir disso, surgem os Algoritmos Genéticos/Evolucionários, que são um método de otimização e busca inspirado na teoria da evolução das espécies e seleção natural proposta por Darwin.

O mecanismo dos Algoritmos Genéticos é obtido a partir de uma população de indivíduos/soluções mapeadas por cromossomos onde cada um está associado a um valor físico. Esses cromossomos são submetidos a um processo de evolução passando por etapas como seleção, reprodução, cruzamento e mutação em muitos ciclos iterativos. Deste modo, ao fim do processo, o melhor cromossomo da população terá a solução otimizada (TÚPAC, 2005).

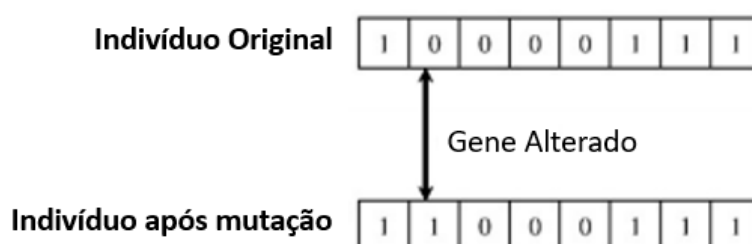
Após muitos ciclos evolutivos, a população tende a conter os melhores indivíduos. Nessa abordagem, o termo população (N_{pop}) se refere ao conjunto de soluções, aos quais o algoritmo está trabalhando em cada geração. A esses indivíduos mais fortes é dada a oportunidade de reprodução aplicando o operador de cruzamento (Cr) com outros indivíduos na população, produzindo descendentes que herdam genes de ambos os pais, conforme ilustrado na Figura 6. O operador de mutação (F) também tem uma função importante dentro do algoritmo, sendo responsável por introduzir novos indivíduos na população através de mudanças aleatórias na característica do cromossomo, como pode ser visto na Figura 7 (ALMEIDA et al., 2010).

Figura 6: Processo de cruzamento com um ponto de corte



Fonte: ALMEIDA et al., 2010 (ADAPTADA)

Figura 7: Processo de Mutação



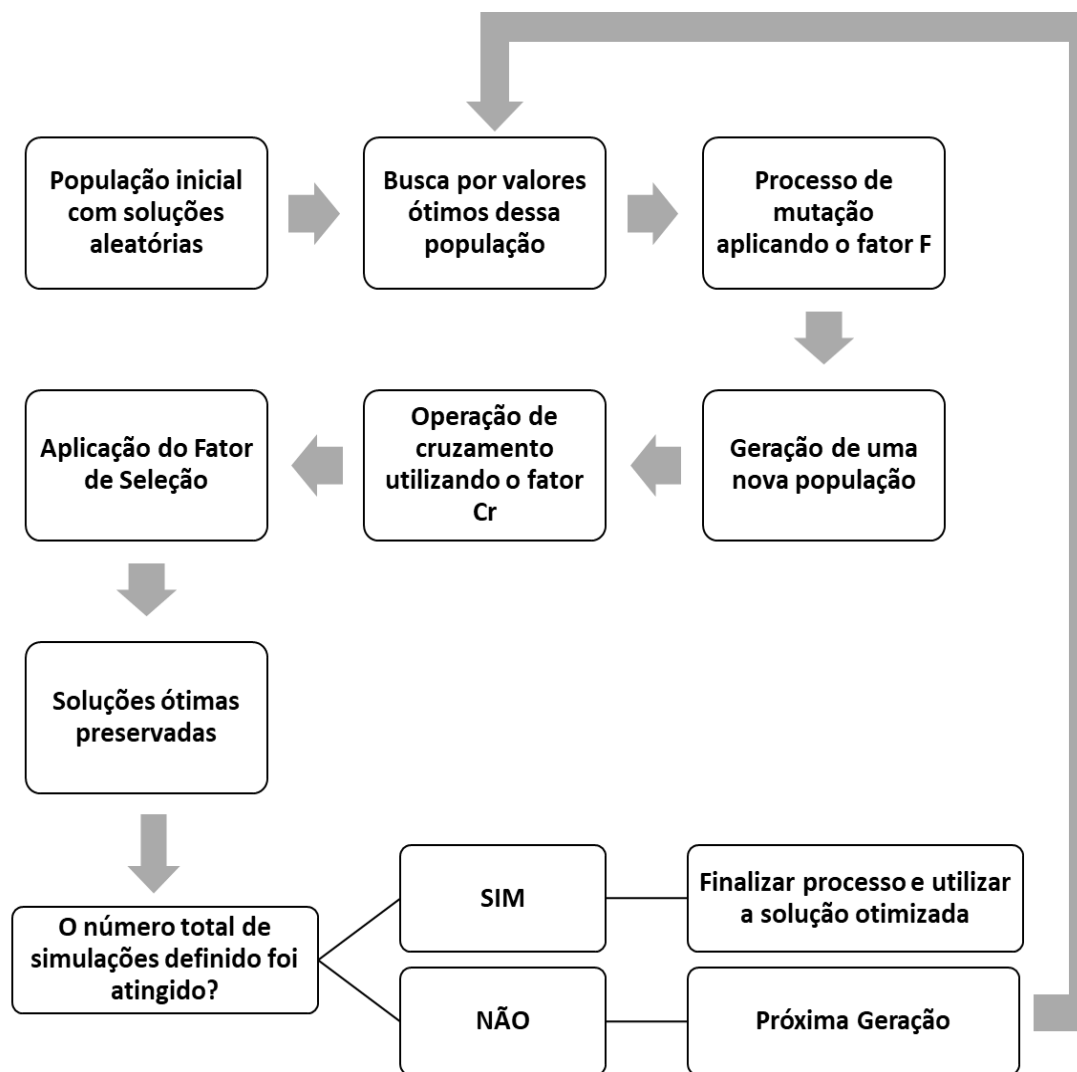
Fonte: ALMEIDA et al., 2010 (ADAPTADA)

Ainda no exemplo da Figura 6, nota-se genes de características binárias (0 ou 1) formando os cromossomos que participam do processo de reprodução. Esses genes podem ser codificados para solucionar vários problemas de otimização, como por exemplo: a representação da condição de abertura de uma válvula inteligente em determinado período de produção, sendo 1 o valor para a válvula aberta e 0 para a válvula fechada. Essa codificação é um dos pontos da metodologia a ser apresentada nas etapas seguintes do presente trabalho.

No fluxograma da Figura 8, é possível observar as etapas do processo de otimização através dos algoritmos genéticos. De maneira sucinta, este tipo de otimização é eficiente na busca por máximos globais, principalmente quando aplicado em problemas não-lineares, complexos, com um alto número de máximos locais e de possibilidades de solução. Este aspecto será útil em uma das etapas de otimização

deste trabalho, principalmente pelo fato do alto número de simulações necessários na busca por uma solução ótima.

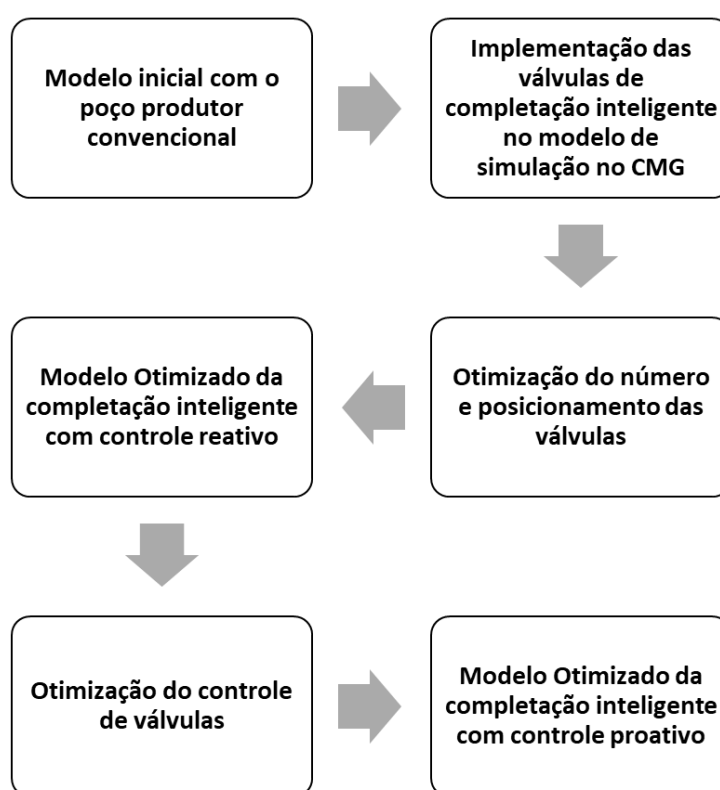
Figura 8: Fluxograma de otimização utilizado pelos Algoritmos Genéticos



3 METODOLOGIA

Nesta parte do presente trabalho, serão apresentadas, de maneira clara e objetiva, todas as etapas da metodologia desenvolvida. Etapas estas que vão desde a representação das válvulas no simulador até otimização do controle das mesmas. Com a função objetivo definida (apresentada na seção 3.4), é possível observar o fluxograma metodológico de forma resumida na Figura 9.

Figura 9: Fluxograma resumido da metodologia desenvolvida



3.1 Representação das válvulas de completção inteligente no CMG

Devido à falta de um recurso para a representação direta do sistema de válvulas inteligentes no simulador de reservatório CMG, neste trabalho foi utilizado um artifício indireto para este propósito. Este artifício consistiu em representar o poço produtor inteligente através do controle individual de cada camada do modelo, ou através de agrupamento de algumas destas camadas a depender da configuração das ICVs dentro do poço.

Figura 10: Código de representação da completção inteligente no poço produtor no CMG

```

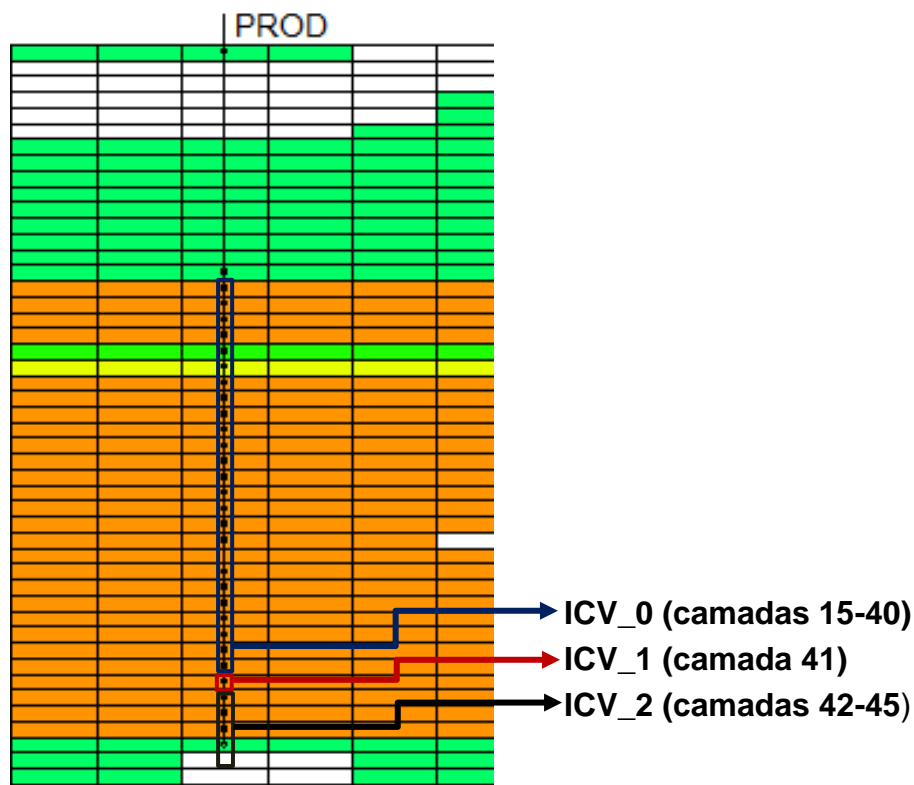
| TRIGGER 'ICV_1'
| ON_LAYER 'PROD' 11 11 41           WCUT > 0.8
| *LAYER-CTRL 'PROD' *CLOSE
| 11           11           41
| END_TRIGGER
| TRIGGER 'ICV_2'
| ON_LAYER 'PROD' 11 11 42           WCUT > 0.8
| *LAYER-CTRL 'PROD' *CLOSE
| 11           11           42
| 11           11           43
| 11           11           44
| 11           11           45
| END_TRIGGER

```

A representação das válvulas foi possível através dos comandos TRIGGER e LAYER-CTRL, os quais são capazes de condicionar a abertura de determinada camada do poço a um parâmetro específico, nesse caso o corte de água (WCUT). No exemplo da Figura 10 é possível notar que a ICV 1 é responsável por controlar a camada 11 11 41, enquanto a ICV 2 é responsável por controlar as camadas 11 11 42, 11 11 43, 11 11 44 e 45. Na Figura 11 é possível visualizar como esta configuração entre as válvulas está distribuída no poço produtor.

Deste modo, foi possível controlar parâmetros de produção como o corte de água (WCUT) e a pressão do fundo de poço BHP (do inglês, Bottom Hole Pressure) em cada zona produtora, no caso deste trabalho o WCUT. Portanto, permitiu simular o sistema de monitoramento presente na completção inteligente, aspecto este de grande importância para o desenvolvimento deste trabalho

Figura 11: Esquema ilustrativo da representação da completção inteligente no poço produtor



3.2 Otimização do Número e Posicionamento das Válvulas

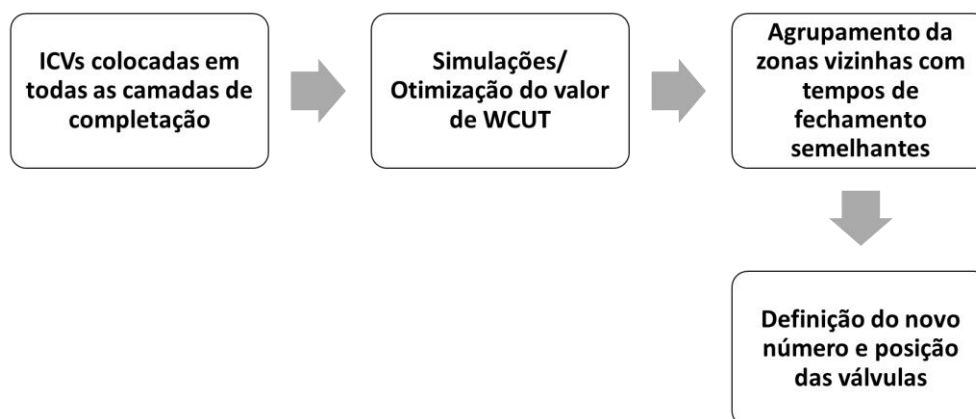
Como visto anteriormente, cada válvula adicional possui um custo relativamente significativo para o projeto. Deste modo, se faz necessário otimizar o número de válvulas na completção inteligente: um número alto de válvulas, além de apresentar um alto custo, não apresentam vantagem pois zonas vizinhas que tem comportamento semelhante podem ser controladas por uma única válvula, já um número baixo de válvulas pode ser pouco eficiente quanto ao controle das diferentes zonas, não justificando o investimento.

Primeiramente, foram implementadas válvulas inteligentes (ICVs) do tipo binária em todas as camadas completadas do modelo. Assim, o valor de $WCUT_{limit}$ foi otimizado inicialmente, através do algoritmo padrão DEGE presente no CMOST (CMG), para esta configuração.

Utilizando o valor de $WCUT_{limit}$ otimizado na etapa anterior, uma nova simulação foi executada, medindo os tempos de fechamento para cada uma das camadas do poço produtor. Então, na sequência, as camadas vizinhas foram agrupadas uma a uma de acordo com a proximidade dos respectivos tempos de

fechamentos, ou seja, se duas camadas possuírem o mesmo tempo de fechamento ou valores muito próximos, deverão ser agrupadas em uma única válvula ICV. Deste modo, foram geradas configurações com diferentes números de válvulas: saindo de um número $(n-1)$ de válvulas utilizadas até 2 válvulas, sendo n o número total de camadas completadas inicialmente. Após esta etapa de agrupamento, todas as configurações foram simuladas gerando um valor de VPL diferente para cada uma e, consequentemente, a configuração com maior VPL encontrado foi o resultado desta etapa de otimização.

Figura 12: Otimização do número de válvulas inteligentes



3.3 Otimização do controle de válvulas

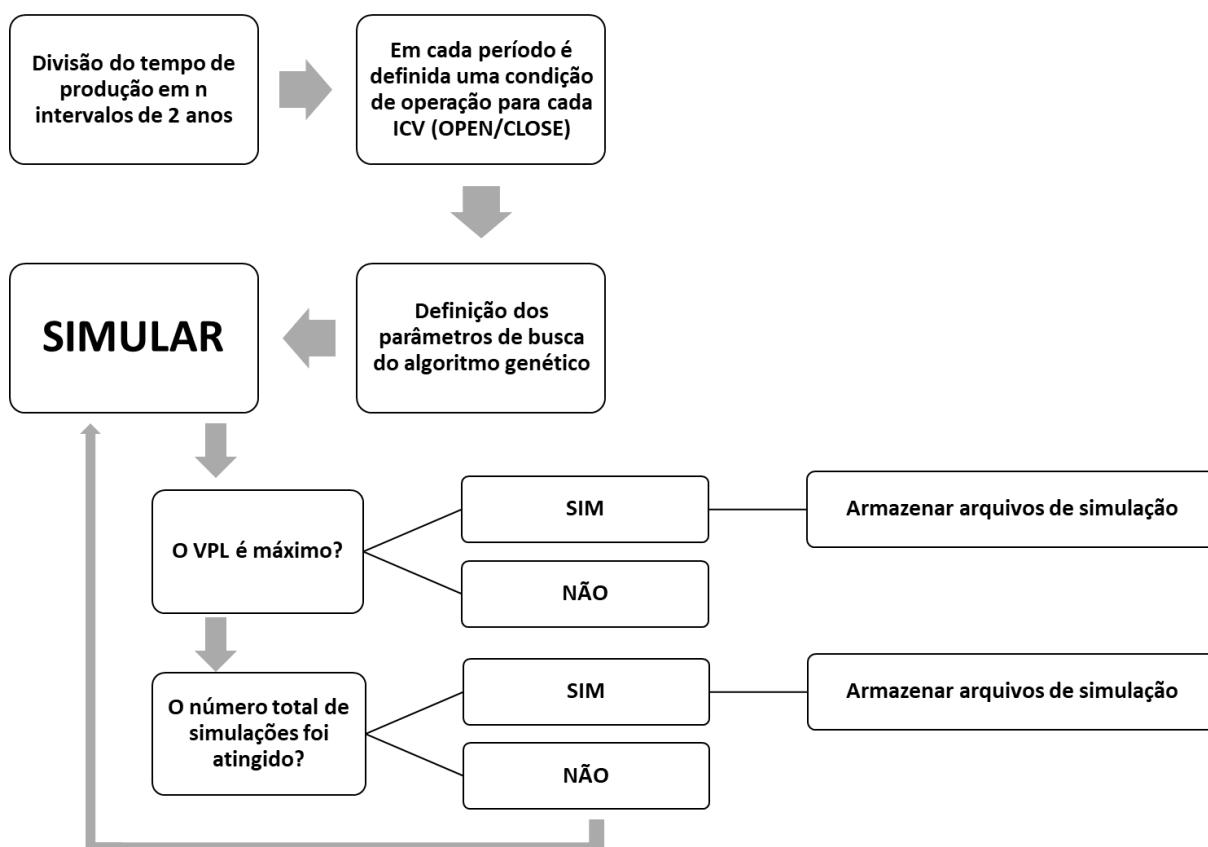
Nesta etapa do trabalho, o objetivo foi a obtenção da melhor configuração para cada válvula ICV, ou seja, aquela que maximizará o VPL do campo. Portanto, foram otimizadas as condições de abertura/fechamento de cada uma das válvulas inteligentes em cada período estabelecido, neste estudo o controle foi otimizado em períodos de 2 anos num tempo total de produção de 30 anos. Assim, possibilitou-se um modo de ação proativo em relação ao controle das válvulas, ou seja, prevendo os eventos que poderão ocorrer no reservatório e agindo de maneira antecipada, aumentando a produção e evitando um fechamento total precoce da zona controlada pela ICV.

Inicialmente, as válvulas inteligentes adotadas serão do tipo Abre-Fecha (binária), diminuindo o gasto computacional e proporcionando um melhor entendimento sobre o processo de otimização.

Para encontrar a configuração ideal entre as válvulas ICVs, foi necessário um alto número de simulações. Por exemplo, numa configuração com 2 válvulas

inteligentes binárias com 14 períodos na qual cada válvula pode ter uma configuração diferente por período, percebe-se que existem 2^{28} configurações diferentes de funcionamento destas válvulas. Utilizando um tempo médio de 2,5 minutos por simulação, seriam necessários 1277 anos, aproximadamente, para se chegar a melhor configuração. Portanto, é impossível executar todas essas possibilidades. Logo, para reduzir este número, se faz necessário a utilização de recursos computacionais de otimização. Neste trabalho, foi desenvolvido um método composto por algoritmos genéticos. Na Figura 13, o fluxograma de trabalho para essa etapa de trabalho pode ser observado.

Figura 13: Esquema ilustrativo para o processo de otimização do controle de válvulas



3.4 Avaliação econômica determinística

Por fim, para quantificar os ganhos com a otimização da completção inteligente, foi feita uma avaliação econômica com parâmetros determinísticos, ou seja, admitindo um cenário econômico fixo. Portanto, é nesta etapa da metodologia que a função objetivo será descrita: a maximização do VPL. Assim, o fluxo de caixa

será construído considerando todos os custos operacionais e de capital, o sistema tributário brasileiro e as receitas com a produção de óleo.

3.4.1 Custos de capital - CAPEX

No custo de capital, consideram-se os gastos com investimentos em plataforma, perfuração e completação. Para calcular o custo de uma plataforma, é levada em conta a capacidade de processamento de óleo e água e a capacidade de injeção. De forma objetiva, Gaspar et al. (2016) adaptaram um parte da metodologia descrita em Hayashi (2006) e chegaram a seguinte relação para calcular os investimentos de plataforma:

$$I_{plat} = 417 + (16.4 \times qp^{oil} + 3.15qp^{water} + 9.61qp^{gas} + 3.15 \times qp^{inj} + 0.1 \times nw) \quad (1)$$

Sendo:

I_{plat} : investimento em plataforma (MMUS\$).

qp^{oil} : capacidade máxima de processamento de óleo (1000 m³/dia)

qp^{water} : capacidade máxima de processamento de água (1000 m³/dia)

qp^{gas} : capacidade máxima de processamento de gás (1000 m³/dia)

qp^{inj} : capacidade máxima de injeção de água (1000 m³/dia)

Além disso foram considerados os custos para implementação da completação inteligente e para cada válvula adicional. Deste modo, o investimento total do projeto será:

$$I_{total} = I_{plat} + I_{IC} + C_{ICV} \times n_{ICVs} \quad (2)$$

Sendo:

I_{IC} : Investimento da implementação da completação inteligente (MMUS\$)

C_{ICV} : Custo para cada válvula inteligente adicional (MMUS\$)

n_{ICVs} : número total de válvulas inteligentes

3.4.2 Custos Operacionais OPEX

O custo operacional de um campo de petróleo engloba os gastos com a produção de óleo e de água e com a injeção de água. Segundo Pinto (2013), os custos do tipo OPEX podem ser calculados com a seguinte relação:

$$(CO)_i = (CPO)_i \cdot (Qo)_i + (CPA)_i \cdot (Qa)_i + (CPG)_i \cdot (Qg)_i + (CIA)_i \cdot (Qinj)_i \quad (3)$$

Sendo:

(Qo): vazão de óleo no período i.

(CPO): custo da produção óleo no período i.

(Qa): vazão de água produzida no período i.

(CPA): custo da produção de água no período i.

(Qg): quantidade de gás produzido no período i.

(CPG): custo da produção de gás no período i.

(Qinj): a vazão de água injetada no período i.

(CIA): custo com a injeção de água no período i.

3.4.3 Receita Operacional

No presente trabalho, foi considerada apenas a receita com a produção de óleo. Portanto, a receita operacional pode ser calculada do seguinte modo:

$$(R_{operacional})_i = (Qo)_i \cdot (Po)_i \quad (4)$$

Sendo:

(Roperacional): Receita operacional no tempo i.

(Qo): vazão de óleo produzido no tempo i.

(PO): preço do óleo no tempo i.

3.4.4 Sistema de tributação sobre a produção

Como os valores presentes no regime fiscal já foram descritos, anteriormente, no cenário econômico, nesta etapa serão apenas demonstradas as formas de calcular cada um dos tributos. De acordo com Pinto (2013), temos:

$$(ROY)_i = 0,10 \cdot (RO)_i \quad (5)$$

Sendo:

(ROY): valor correspondente dos Royalties no tempo i.

(RO): receita operacional no tempo i.

Como pode-se observar, o valor dos royalties incide direto na receita bruta da produção, mesma situação do PIS/PASEP COFINS, demonstrado na relação a seguir:

$$(PPC)_i = tPPC \cdot (RO)_i \quad (6)$$

Sendo:

(PPC)_i: PIS/PASEP COFINS no tempo i.

tPPC: Taxa correspondente ao PIS/PASEP COFINS.

RO: receita operacional no tempo i.

Diferentemente das taxas anteriores, o imposto de renda (IR) e a contribuição social (CS) incidem somente sobre o lucro tributável, o que pode ser visto nas relações abaixo:

$$(IR)_i = 0,25 \cdot \{(RO)_i - (CO)_i - (ROY)_i - (PPC)_i - (Itotal)_i\} \quad (7)$$

$$(CS)_i = 0,9 \cdot \{(RO)_i - (CO)_i - (ROY)_i - (PPC)_i - (Itotal)_i\} \quad (8)$$

Sendo:

(IR)_i: imposto de renda no tempo i.

(CS)_i: contribuição social no tempo i.

3.4.5 Função Objetivo - Valor presente líquido (VPL)

Por fim, pode-se definir o cálculo do VPL do campo, o qual será a função-objetivo deste trabalho. Assim como definido em trabalhos anteriores como em Gaspar et al. (2016) e Pinto (2013), o VPL pode ser obtido através das seguintes relações:

$$VPL = \sum_{k=1}^{nt} \frac{FC_{tk}}{(1+r)^{tk}} \quad (9)$$

$$FC_{tk} = (RO)_i - (CO)_i - (ROY)_i - (PPC)_i - (IR)_i - (CS)_i - (Itotal)_i \quad (10)$$

Sendo:

VPL: Valor presente líquido do campo.

FC_{tk}: Fluxo de caixa no tempo k.

r: taxa de desconto.

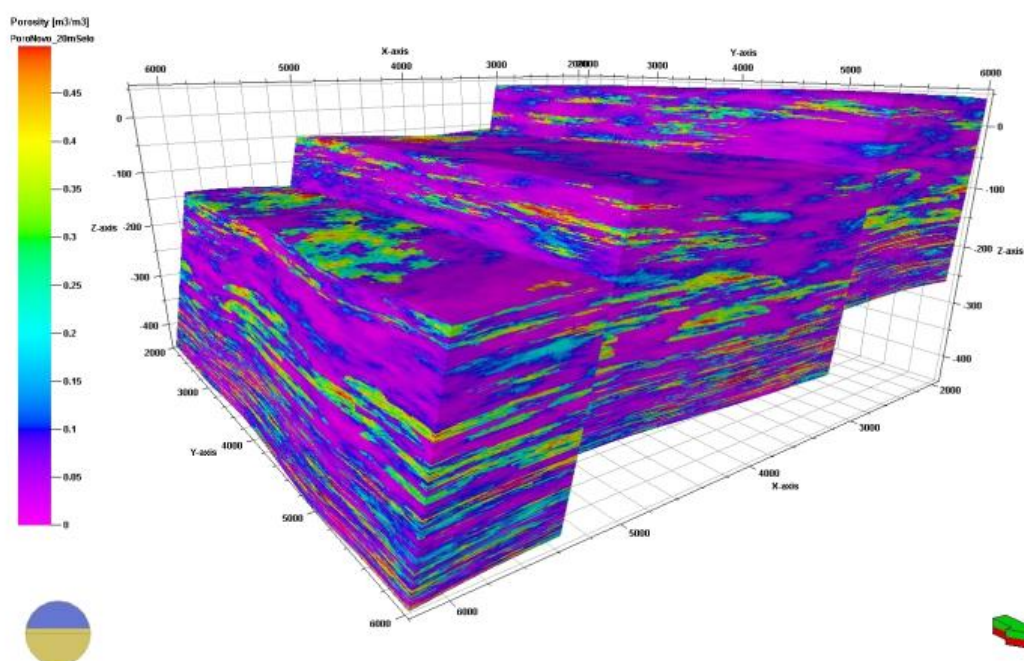
4 ESTUDO DE CASO

Nesta parte do presente trabalho, serão apresentadas, de maneira clara e objetiva, todas as etapas necessárias ao estudo de caso desenvolvido. Etapas estas que vão desde a apresentação do modelo de reservatório e definição dos parâmetros operacionais até definição do cenário econômico determinístico.

4.1 Modelo CERENA-I

O modelo sintético CERENA-I foi desenvolvido com o intuito de reproduzir as características dos reservatórios carbonáticos presentes nos campos de produção do Pré-Sal, especialmente do campo de Júpiter. Além disso, possui um conjunto de dados de alta resolução de propriedades petrofísicas e petroelásticas, aumentando o grau de realidade da simulação. As dimensões da malha utilizada para a construção do modelo foram 161x161x300 blocos, com 25x25x1m de espaçamento. Na figura é apresentada distribuição de porosidade do modelo original composto por 3 blocos (MADEIRA, 2014).

Figura 14: Vista 3D da distribuição de porosidade no modelo CERENA-I original

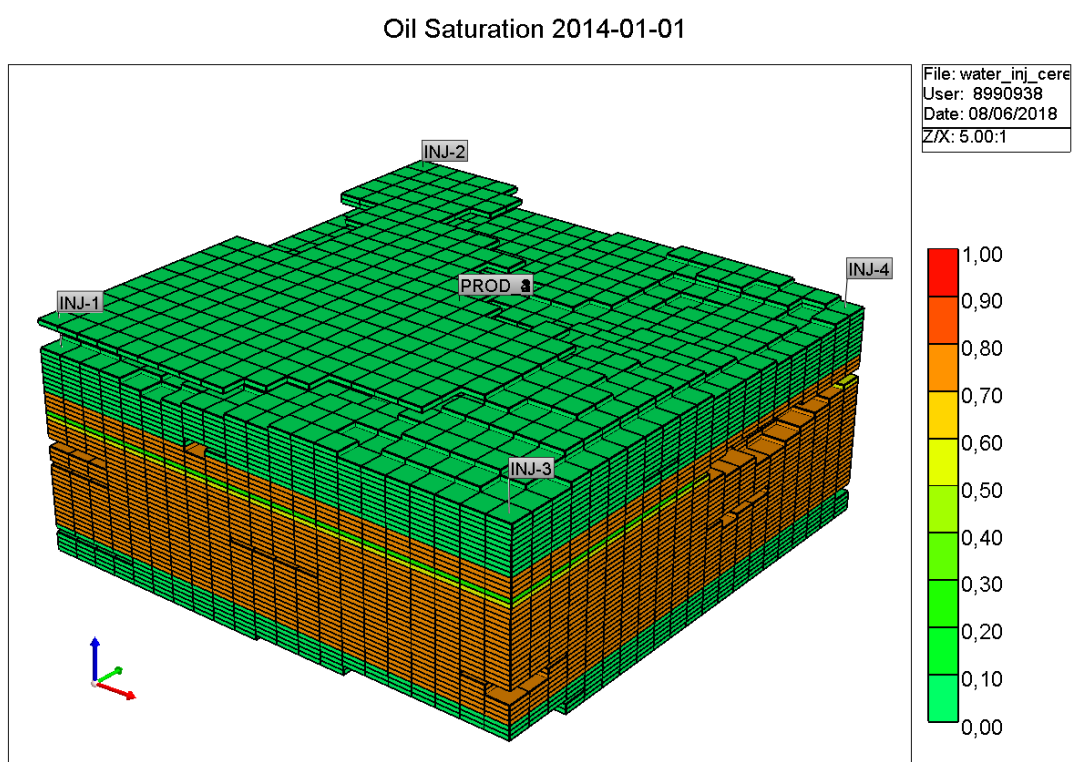


Fonte: MADEIRA, 2014

Para a avaliação do uso da completção inteligente, foi selecionado o modelo setorial extraído do bloco central do modelo original CERENA-I utilizado por Fabusuyi (2015). No entanto, apesar de consideravelmente menor que o modelo original, reproduz a variabilidade total do campo completo. Deste modo, o modelo recortado possui uma dimensão de malha de 22x22x50 com um espaçamento de 50x50x6 m de espaçamento.

Portanto, para o presente estudo, foi utilizado um esquema *Five-spot* para a configuração da produção: 4 poços injetores nas extremidades e 1 poço produtor no centro. Destacando que o uso das válvulas inteligentes foi feito apenas no poço produtor. Na Figura 15 é mostrada uma vista tridimensional do modelo utilizado.

Figura 15: Vista Geral do modelo, configuração dos poços e saturação inicial de óleo



Como o foco deste trabalho é a implementação do sistema de completção inteligente, foi utilizado um cenário geológico fixo, descrito de forma geral na sequência.

Tabela 1: Propriedades Rocha/Fluido

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|--------------------------------|----------------------|-------------------|
| Pressão de referência da rocha | 235 | KPa |
| Compressibilidade da rocha | $4,5 \times 10^{-4}$ | kPa ⁻¹ |
| Pressão de referência da água | 98 | Kpa |
| Compressibilidade da água | $4,9 \times 10^{-4}$ | kPa ⁻¹ |
| Densidade da água | 1,01 | g/cm ³ |

Quanto às características de porosidade e permeabilidade do reservatório, foram utilizados os parâmetros originais do modelo CERENA-I. Não foram disponibilizados os valores e formas de cálculo explicitamente para estas características, entretanto pode-se visualizar a distribuição destas no modelo nas Figuras 16 e 17 abaixo.

Figura 16: Permeabilidade do Modelo

Permeability I (md) 2014-01-01

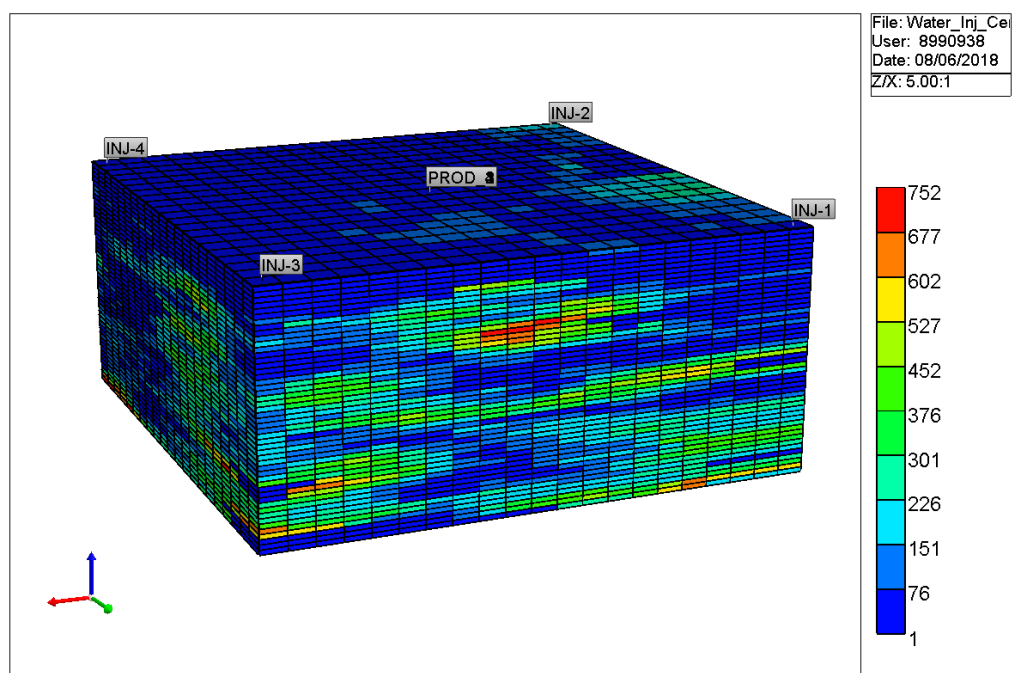
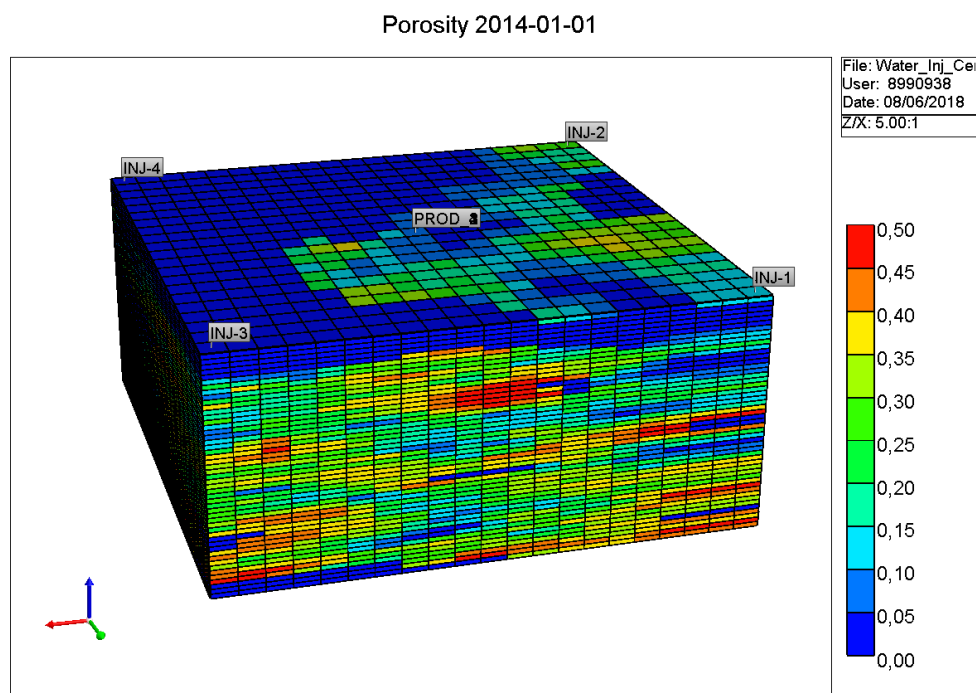


Figura 17: Porosidade do Modelo



4.2 Pacote de *softwares* de simulação – CMG

Nesta seção do trabalho serão descritos, de forma sucinta e didática, a função de cada *Software* do CMG (do inglês, Computer Modelling Group) que foi utilizado.

4.2.1 Builder

O *Builder* é responsável pela criação de modelos de simulação fornecendo uma estrutura para integração de dados e gerenciamento de fluxo de trabalho entre os simuladores IMEX, GEM, STARS e fontes de dados externas. Além disso, através desse *software* podemos criar novos poços, perfurá-los e completá-los, recurso este que foi utilizado mais a frente neste trabalho.

4.2.2 GEM

O GEM é um simulador de reservatório baseado na solução composicional da Equação de Estado. Isso significa que o óleo é tratado de forma distinta entre grupos de hidrocarbonetos, como exemplo C1, C2-C6 e C7+. Portanto, se adéqua

perfeitamente ao modelo que será estudado, tendo em vista a presença de óleo leve nos reservatórios do Pré-Sal.

4.2.3 CMOST

O CMOST é um *software* que permite a otimização do modelo de simulação através dos parâmetros definidos, através do qual é possível fazer um ajuste de histórico do modelo, otimizar o VPL ou outra função objetivo. Neste estudo, o programa será utilizado para maximizar o VPL do campo visando encontrar o valor limite do corte de água ($WCUT_{Limit}$) para cada válvula.

4.3 Definição dos parâmetros de operação de poço

Para fins de padronização, os poços injetores 1, 2, 3 e 4 possuem uma zona de injeção no reservatório com comprimento de 60 m, 70m, 70m e 60m, respectivamente. Além disso foram definidas algumas condições de operação, as quais podem ser vistas nas Tabelas 2 e 3. Estes parâmetros permanecerão constantes durante todo o processo de simulação a ser realizado.

Tabela 2: Condições operacionais para o poço produtor

| Parâmetro de controle | Valor |
|--|---------------------------|
| Mínima Pressão de Fundo de Poço (BHP min) | 45400 KPa |
| Máxima Vazão de Líquidos na Superfície (STL max) | 12000 m ³ /dia |

Tabela 3: Condições operacionais para os 4 poços injetores

| Parâmetro de controle | Valor |
|---|---------------------------|
| Máxima Pressão de Fundo de Poço (BHP max) | 64121.2 KPa |
| Máxima Vazão Água na Superfície (STW max) | 10000 m ³ /dia |

Um outro detalhe para os poços injetores é que estes iniciam o período de produção inativos e são ativados através de uma condição de Mínima Pressão de Campo de 49299.6 Kpa, ou seja, quando a média das pressões de fundo dos poços (BHP) é menor que o valor definido, os injetores são automaticamente abertos. Este

é um parâmetro importante, pois permite que a pressão do reservatório seja mantida praticamente constante e que a quantidade de água injetada seja variável de acordo com o comportamento do reservatório durante a produção.

4.4 Definição do cenário econômico determinístico

Neste estudo, para avaliar o potencial econômico do campo, foi utilizado um cenário determinístico. Isto significa que parâmetros econômicos como preço do barril de óleo e taxa de desconto foram fixados para o cenário mais provável.

Tabela 4: Cenário econômico determinístico

| Parâmetro | Valor |
|--|--------------|
| Preço do óleo (US\$/m ³) | 257.9 |
| Custo da produção de óleo (US\$/m ³) | 48.57 |
| Custo da produção de água (US\$/m ³) | 4.86 |
| Custo da injeção de água (US\$/m ³) | 4.86 |
| Taxa de desconto anual (% a.a.) | 9 |
| Custo da produção de gás (US\$/m ³) | 0.013 |

Além disso foi utilizado o Regime Fiscal brasileiro como parâmetros do cenário, o que pode ser observado na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5: Regime Fiscal Brasileiro

| Parâmetro | Valor |
|---------------------|--------------|
| Royalties | 10% |
| PIS/Confins | 9,25% |
| Contribuição Social | 9% |
| Imposto de Renda | 25% |

Por fim, um dos principais parâmetros que pertence a este cenário: custos de investimento na completção inteligente. Os valores adotados foram retirados de Pinto (2013) e podem ser vistos na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6: Custo de implementação da Completção Inteligente

| Parâmetro | Valor |
|--|--------------|
| Custo de instalação da Completção Inteligente (MMUS\$) | 1 |
| Valor para cada Válvula ICV adicional (MMUS\$) | 0,3 |

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

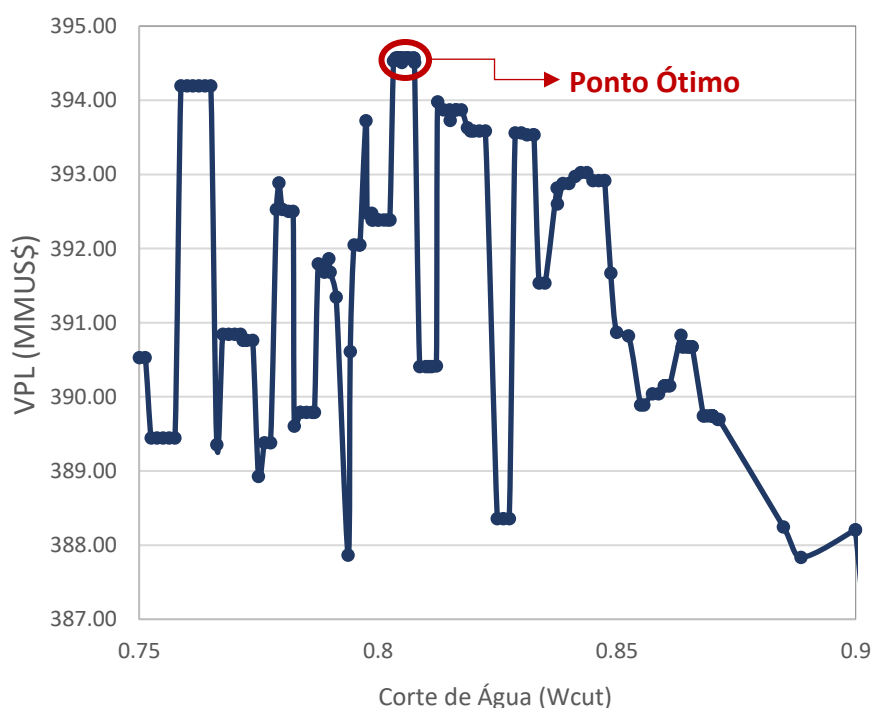
Agora, de maneira clara e analítica, serão apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta no estudo de caso apresentado na seção anterior do presente trabalho.

5.1 Otimização do Número e Posicionamento das Válvulas

Como proposto na metodologia inicial, foi feita uma otimização inicial para o poço com válvulas em todas as zonas com dois intuitos principais: encontrar o Wcut ótimo de funcionamento e descobrir o tempo de fechamento de cada zona para o agrupamento da etapa seguinte.

No gráfico da Figura 18 é possível observar o comportamento do processo de otimização do WCUT visando o aumento do VPL. Nota-se que é uma função não linear e com vários pontos de máximos locais, portanto foi utilizada a seguinte parametrização: 200 simulações, 4 algarismos significativos e um algoritmo de busca desenvolvido pelo próprio CMOST (CMG DECE). Deste modo foi possível chegar ao VPL máximo com maior eficiência.

Figura 18: Gráfico de otimização do VPL em função do WCUT



Após a otimização inicial, é possível alcançar um VPL ótimo de MMUS\$ 394,51 utilizando um $WCUT_{Limit}$ de 0,8049 para todas as camadas completadas do poço. Deste modo, tomando como referência este modelo com WCUT otimizado, foi possível verificar o tempo de fechamento de cada camada individualmente e, portanto, realizar a etapa seguinte de agrupamento das zonas com comportamento semelhante, conforme previsto na metodologia. Na tabela a seguir, são dados os tempos de fechamento de cada camada, sendo $\Delta t_{n - (n+1)}$ a diferença entre o tempo de fechamento da camada n e da camada seguinte $n+1$.

Tabela 7: Tempo de fechamento de cada camada de completção

| Camada | Tempo de fechamento (dias) | $\Delta t_{n - (n+1)}$ |
|---------------|-----------------------------------|--|
| 15 | 10957 | 0 |
| 16 | 10957 | 0 |
| 17 | 10957 | 0 |
| 18 | 10957 | 0 |
| 19 | 10957 | 0 |
| 20 | 10957 | 0 |
| 21 | 10957 | 0 |
| 22 | 10957 | 0 |
| 23 | 10957 | 0 |
| 24 | 10957 | 0 |
| 25 | 10957 | 0 |
| 26 | 10957 | 0 |
| 27 | 10957 | 0 |
| 28 | 10957 | 0 |
| 29 | 10957 | 0 |
| 30 | 10957 | 0 |
| 31 | 10957 | 0 |

| Camada | Tempo de fechamento (dias) | $\Delta t_{n - (n+1)}$ |
|---------------|-----------------------------------|--|
| 32 | 10957 | 0 |
| 33 | 10957 | 0 |
| 34 | 10957 | 0 |
| 35 | 10957 | 0 |
| 36 | 10957 | 0 |
| 37 | 10957 | 0 |
| 38 | 10957 | 0 |
| 39 | 10957 | 0 |
| 40 | 10957 | 8035 |
| 41 | 2922 | 1522 |
| 42 | 1400 | 1289,964039 |
| 43 | 110,035961 | 51,035961 |
| 44 | 59 | 58 |
| 45 | 1 | 1 |

Sendo assim, de acordo com a metodologia, é possível agrupar as zonas com tempos de fechamento iguais ou próximos, camada por camada, como pode ser visto nas tabelas 8, 9, 10, 11 e 12 a seguir.

Num primeiro momento, é possível agrupar as camadas 15 a 40 na primeira válvula (ICV1), conforme na Tabela 8, visto que nessa região o WCUT permanece abaixo do limite durante todo o período de produção, ou seja, as camadas permanecem abertas todo o tempo, totalizando uma quantidade de 6 válvulas inteligentes.

Tabela 8: Posicionamento ideal para a configuração com 6 válvulas inteligentes

| 6 válvulas | |
|-------------------|----------------|
| Válvula | Camadas |
| ICV1 | 15-40 |
| ICV2 | 41 |
| ICV3 | 42 |
| ICV4 | 43 |
| ICV5 | 44 |
| ICV6 | 45 |

Para o segundo agrupamento, as camadas 43 e 44 são colocadas sob comando da ICV4, totalizando 5 válvulas inteligentes, como pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 9: Posicionamento ideal para a configuração com 5 válvulas inteligentes

| 5 válvulas | |
|-------------------|----------------|
| Válvula | Camadas |
| ICV1 | 15-40 |
| ICV2 | 41 |
| ICV3 | 42 |
| ICV4 | 43-44 |
| ICV5 | 45 |

Na sequência, a camada 45 é agrupada ao conjunto da ICV4, reduzindo o número de válvulas para 4, o que pode ser observado na Tabela 10.

Tabela 10: Posicionamento ideal para a configuração com 4 válvulas inteligentes

| 4 válvulas | |
|-------------------|----------------|
| Válvula | Camadas |
| ICV1 | 15-40 |
| ICV2 | 41 |
| ICV3 | 42 |
| ICV4 | 43-44-45 |

Num quarto agrupamento, a camada 42 é incorporada ao conjunto da ICV3, totalizando uma quantidade de 3 válvulas, como observa-se na Tabela 11.

Tabela 11: Posicionamento ideal para a configuração com 3 válvulas inteligentes

| 3 válvulas | |
|-------------------|----------------|
| Válvula | Camadas |
| ICV1 | 15-40 |
| ICV2 | 41 |
| ICV3 | 42-43-44-45 |

Por fim, chegando à configuração de 2 válvulas inteligentes, a camada 41 é incorporada ao comando da ICV2, como pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12: Posicionamento ideal para a configuração com 2 válvulas inteligentes

| 2 válvulas | |
|-------------------|----------------|
| Válvula | Camadas |
| ICV1 | 15-40 |
| ICV2 | 41-42-43-44-45 |

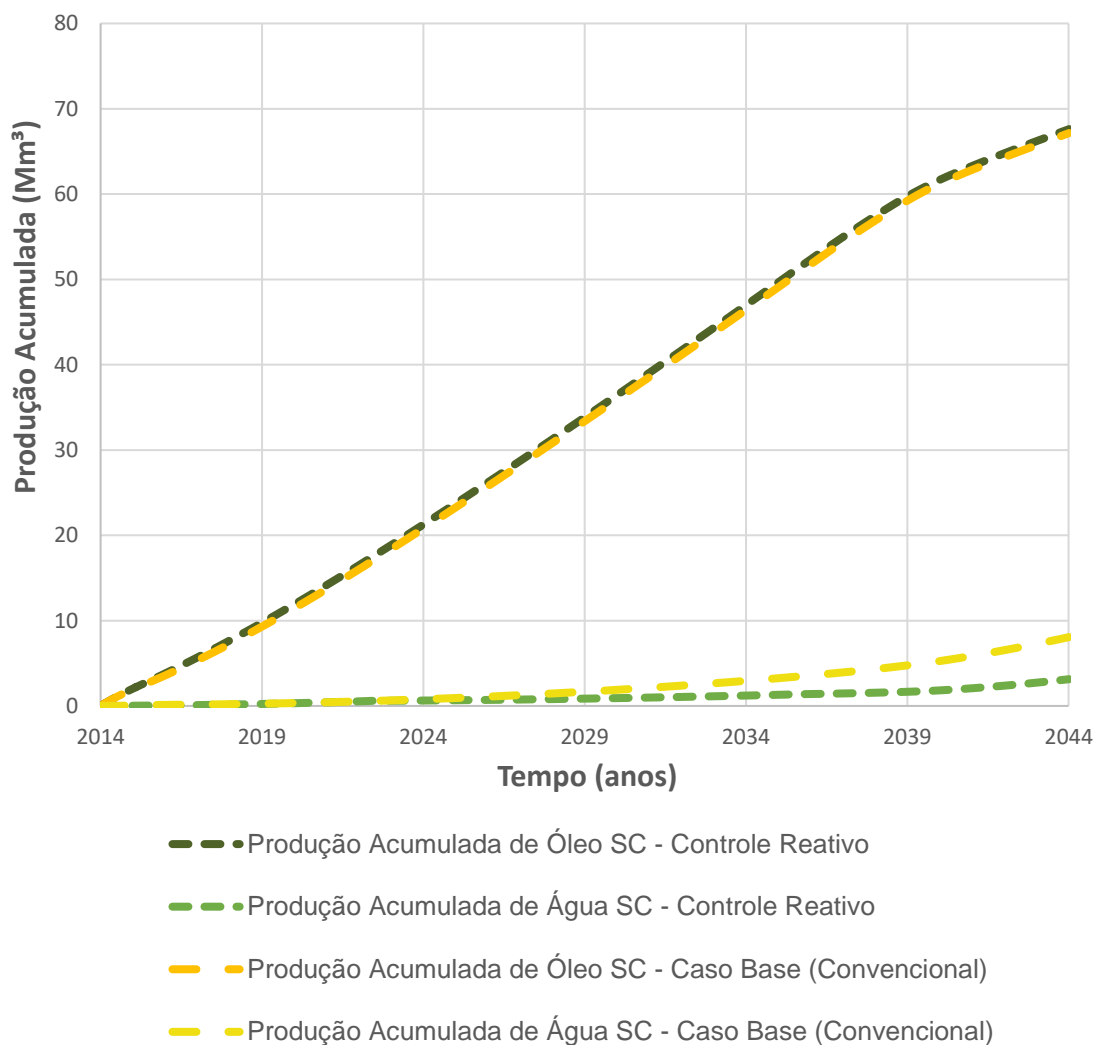
Sabendo o posicionamento otimizado para cada válvula em diferentes configurações, é preciso descobrir o número ideal de ICVs a ser utilizado, ou seja, aquele que maximiza o VPL. Deste modo, foram simuladas todas as 5 configurações anteriores, comparando ao caso base do poço convencional. Os resultados em termos de produção e rentabilidade podem ser observados na Tabela 13. Sendo, N_p a produção de óleo acumulada, W_p a produção de água acumulada e W_{inj} a quantidade total de água injetada.

Tabela 13: Resultados econômicos e de produção para cada configuração

| Configuração | ΔN_p (m³) (10⁵) | ΔW_p (m³) (10⁶) | ΔW_{inj} (m³) (10⁶) | ΔVPL (MMUS\$) |
|---------------------|---|---|---|---|
| 2 válvulas | 3,79 | -4,22 | 1,92 | 35,94 |
| 3 válvulas | 4,65 | -4,93 | 2,23 | 37,95 |
| 4 válvulas | 1,77 | -5,40 | 2,83 | 33,23 |
| 5 válvulas | -2,03 | -5,87 | 2,02 | 8,71 |
| 6 válvulas | -2,58 | -5,90 | 1,90 | 4,60 |

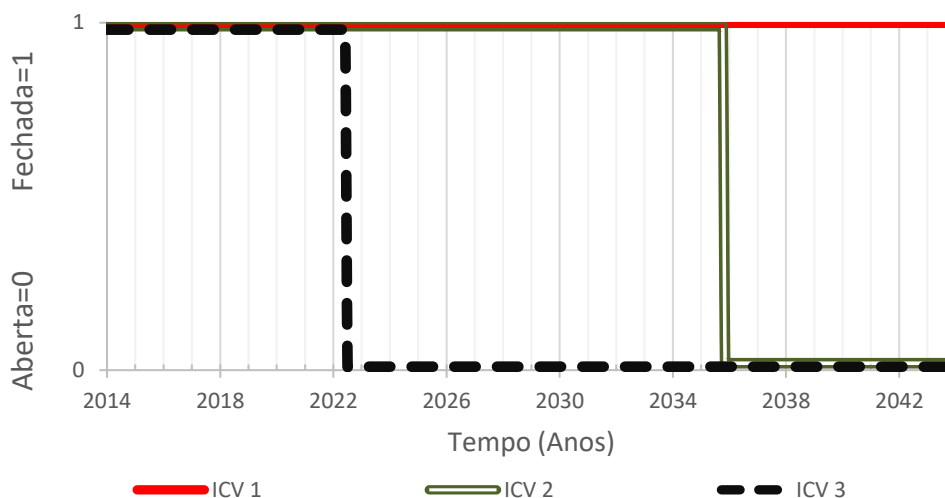
Analisando a tabela acima, nota-se um ganho de produção total de óleo para as configurações com 2, 3 e 4 válvulas, com um destaque maior para a configuração com 3 válvulas. Já em relação a produção de água, houve uma redução significativa para todas as configurações, evidenciando a eficácia das ICVs no controle dessa produção. Por fim, temos a configuração ótima que será utilizada na etapa seguinte deste trabalho: a configuração de 3 válvulas, a qual alcançou o maior incremento em termos de VPL.

Figura 19: Comparativo entre a Configuração de 3 válvulas (controle reativo) e o caso convencional (Base)



No gráfico da Figura 19, nota-se um leve incremento na produção acumulada de óleo e ao mesmo tempo uma redução significativa da produção acumulada de água no poço produtor. Isso explica-se por um fato que já era esperado: quando as zonas produtoras ultrapassam o $WCUT_{Limit}$, a válvula inteligente é automaticamente fechada de maneira reativa, priorizando a produção de zonas com maior saturação de óleo. O fechamento das ICVs pode ser observado no gráfico da Figura 20 a seguir.

Figura 20: Configuração de Abertura/Fechamento das 3 válvulas ICVs em uso



Ainda analisando o gráfico da Figura 20, observa-se num primeiro momento o fechamento da ICV 3, seguida pelo fechamento da ICV 2. Este resultado está dentro do esperado visto que a saturação de água tende a aumentar de baixo para cima, devido ao maior valor de densidade da água, ou seja, as zonas mais profundas atingem o $WCUT_{Limit}$ mais rapidamente. Fazendo um adendo a esta análise, a ICV 1, mesmo permanecendo aberta por todo o período produtivo, se faz necessária ao sistema de completção inteligente implementado, pois é responsável por isolar as camadas 15 a 40 do poço produtor. Isso permite o monitoramento individual dos parâmetros produtivos como Vazão de Óleo e Corte de Água, além disso, também permite o fechamento individual das ICVs 2 e 3, mantendo a produção da zona da ICV 1 aberta durante todo o tempo.

5.2 Otimização do controle de válvulas

Com o número e o posicionamento das ICVs definidos e otimizados, é possível otimizar o controle destas válvulas durante o período de produção. Na etapa anterior, foi utilizado um controle do tipo reativo, ou seja, que fecha a válvula após o $Wcut$ ser atingido, já nesta etapa, será feito um controle proativo das ICVs, buscando uma maneira mais eficiente ainda de produção.

Inicialmente, será adotada uma configuração de válvula do tipo binária (abre e fecha) devido ao alto custo computacional para o processo de otimização. Sendo assim, o tempo de produção será dividido em 15 períodos de 2 anos e no final de cada um desses períodos as ICVs poderão ser reconfiguradas de modo a otimizar a

produção. Como a produção de água da ICV1 é pequena e não passa o Wcut em nenhum momento, a válvula será considerada aberta em todo o processo, reduzindo o número de parâmetros e o custo computacional. Deste modo, serão 28 parâmetros a serem otimizados no total, o que pode ser observado na Tabela 14 .

Tabela 14: Palpite inicial da configuração de abertura entre as ICVs

| Válvula | Ano inicial para cada Período Produtivo | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2016 | 2018 | 2020 | 2022 | 2024 | 2026 | 2028 | 2030 | 2032 | 2034 | 2036 | 2038 | 2040 | 2042 |
| ICV2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| ICV3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Sendo 0 = Válvula fechada e 1 = Válvula aberta

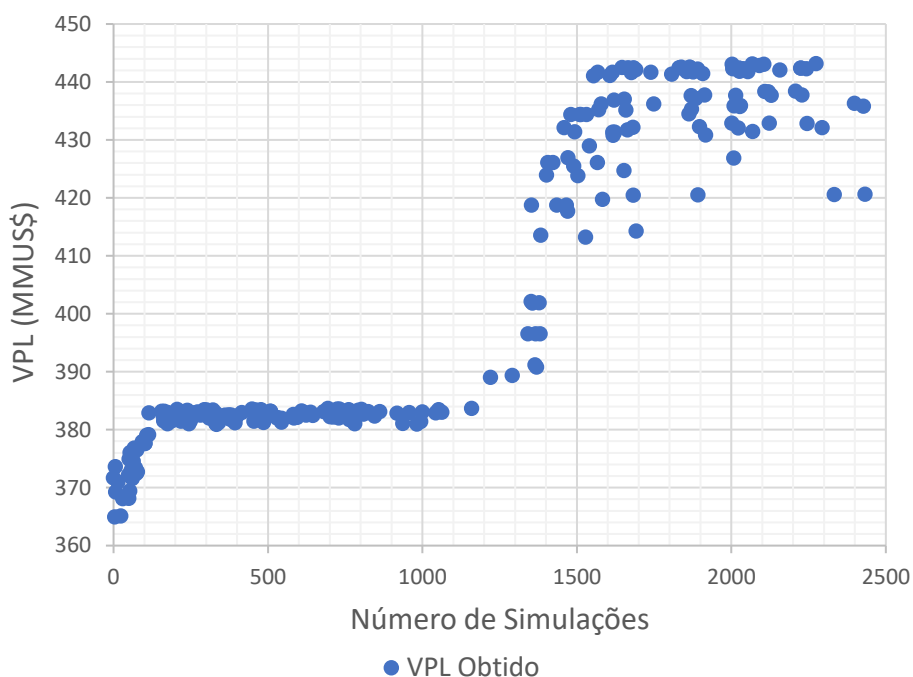
*As válvulas começam todas abertas em 2014 e ficam fechadas ao final do processo em 2044, por isso esses períodos não devem ser considerados no processo de otimização.

Neste trabalho será utilizado o “Algoritmo Genético” com a seguinte configuração da tabela abaixo.

Tabela 15: Parâmetros operacionais de busca do algoritmo genético/evolucionário

| Parâmetro | Valor |
|------------------------------------|-------|
| Nº Total de Simulações | 2500 |
| Fator de Mutação (F) | 0,3 |
| Taxa de Crossover (Cr) | 0,7 |
| Tamanho da População (N_{pop}) | 50 |

Deste modo, executando o processo de simulação foi possível chegar a um VPL otimizado de MMUS\$ 443,13 após 2500 simulações corridas. No gráfico da Figura 21, observa-se o comportamento do processo de otimização.

Figura 21: Evolução do VPL de acordo as simulações comandadas pelo algoritmo

Na Tabela 16 é feita a comparação entre os tipos os dois tipos controle, Reativo e Proativo, e o caso base do poço convencional.

Tabela 16: Comparação entre os resultados econômicos e de produção

| Controle | ΔN_p (m ³) (10 ⁵) | ΔW_p (m ³) (10 ⁶) | ΔW_{inj} (m ³) (10 ⁶) | ΔVPL (MMUS\$) |
|-----------------|--|--|--|-----------------------|
| Reativo | 4,65 | -4,93 | 2,23 | 37,95 |
| Proativo | 5.75 | -3.16 | 8.98 | 45.57 |

Analisando os resultados, nota-se um aumento de VPL significativo para o controle proativo que pode ser explicado pelo ganho na produção de óleo e pela redução da injeção de água, mesmo com uma menor redução da produção de água. Isso se deve ao fato de o controle proativo agir de maneira antecipada aos eventos dentro do reservatório, e deste modo, priorizar sempre as camadas do poço com maior potencial produtivo.

Figura 22: Gráfico comparativo entre as Vazões de Produção de Óleo

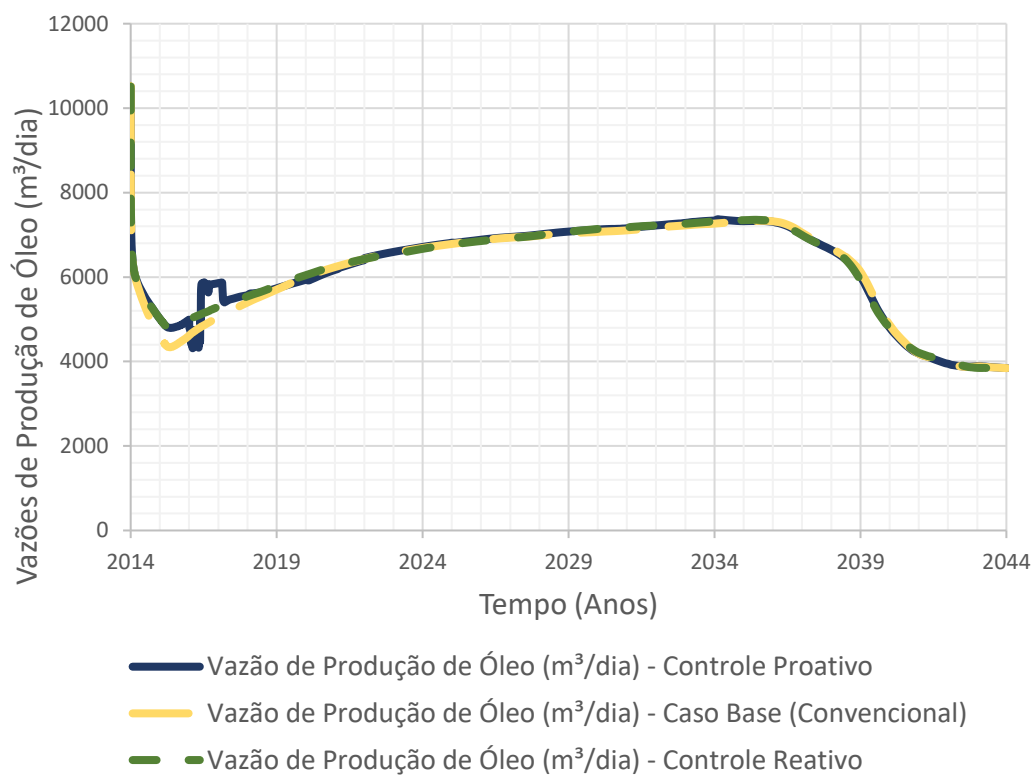
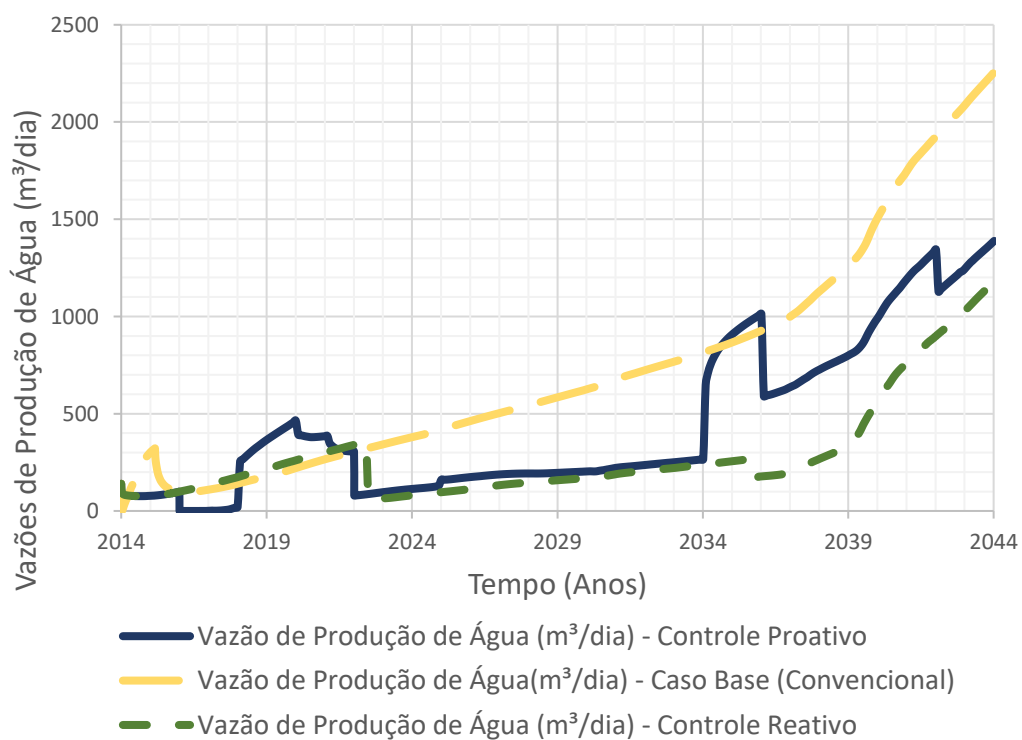


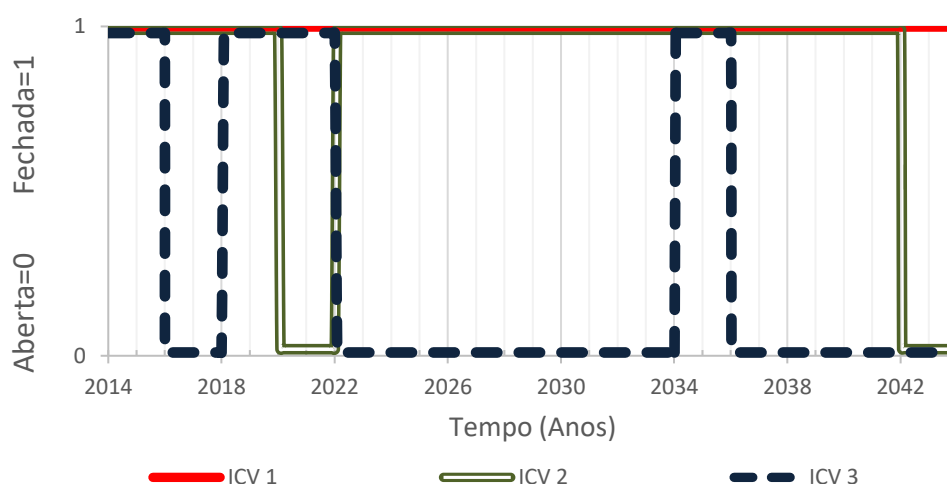
Figura 23: Gráfico comparativo entre as Vazões de Produção de Água



Analisando os gráficos das Figuras 22 e 23, observa-se um aumento na produção de óleo do controle proativo logo no início do período em 2016, paralelamente no mesmo período, a produção de água é levada a zero e depois aumenta em concordância com o aumento da produção de óleo. Esta configuração particular do controle proativo se mostrou eficiente no cumprimento da função objetivo, pois foi capaz de aumentar a produção de óleo e reduzir a produção de água num período inicial, que é o mais influente para o fluxo de caixa em termos de valor presente, maximizando desta forma o VPL total do modelo estudado. Esse fato é relacionado a previsão dos eventos no reservatório, possibilitada através do controle proativo.

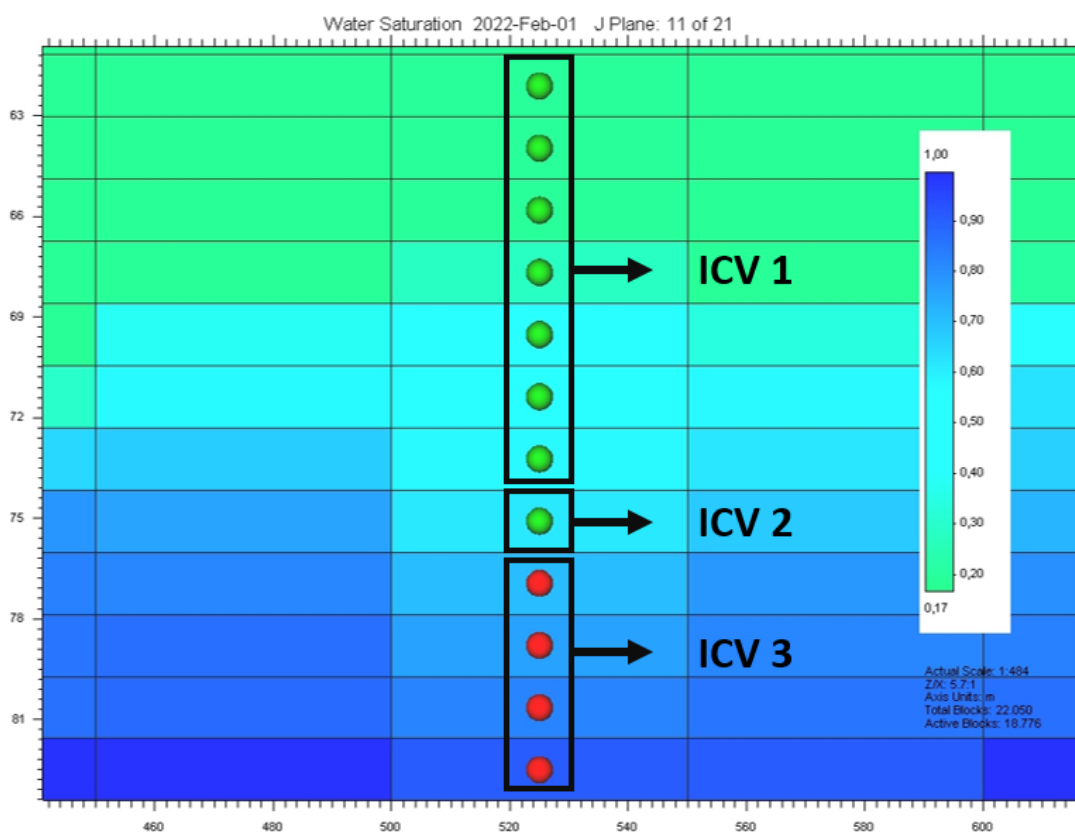
Atrelando a análise gráfica da produção com a redução da quantidade de água injetada presente na Tabela 16, uma das possíveis conclusões é que houve uma manutenção da pressão de fundo do poço mais eficiente do que nos casos anteriores, ou seja, foi possível prever as correntes de fluxo de água no reservatório, evitando assim a produção da água de injeção. Além disso num aspecto geral, apresentou uma significativa redução da água produzida em comparação com o caso base, porém menor que no controle reativo, aspecto este que foi compensado pelo ganho de produção de óleo pelo controle proativo. No gráfico da Figura 24, é possível observar detalhadamente os momentos de abertura e fechamento das válvulas utilizadas durante a produção.

Figura 24: Configuração de Abertura/Fechamento das ICVs no controle proativo



Um outro ponto que pode ser analisado é a influência direta da abertura/fechamento das válvulas na vazão de produção de água, observando os gráficos das Figuras 23 e 24 nota-se que no momento exato de fechamento de uma das ICVs essa produção reduz significativamente e que no momento de abertura a produção aumenta simultaneamente. Por exemplo, em 2022 a ICV 3 é fechada, reduzindo instantaneamente a produção de água. Na Figura 25, é possível observar o fechamento e abertura das válvulas em fevereiro/2022 de acordo com a saturação de água na respectiva zona do reservatório.

Figura 25: Mapa de Saturação de Água e configuração de abertura das camadas do poço



5 CONCLUSÕES

Como conclusão deste trabalho, alcançou-se o objetivo de desenvolvimento de uma metodologia, a qual otimiza o funcionamento do controle de válvulas na completação inteligente, visando a redução da produção de água e o aumento da produção de óleo. O estudo foi feito em um modelo reduzido de reservatório carbonático com 4 poços injetores e 1 produtor.

Após o aprimoramento da metodologia, foi possível realizar completamente a primeira etapa do trabalho, a otimização do número e do posicionamento das válvulas, gerando resultados que estavam dentro do esperado. Para o poço produtor em estudo, após a etapa de agrupamento das camadas sob o comando das respectivas válvulas, a configuração otimizada foi a que possui 3 válvulas atingindo o maior VPL. Deste modo, foi possível chegar a um controle do tipo reativo totalmente otimizado, viabilizando o início da próxima etapa da metodologia: a otimização do controle das válvulas.

Para a etapa de otimização do controle das válvulas, com o número e o posicionamento das ICVs definidos, pôde-se aplicar um novo tipo de controle: o proativo. Neste modo de controle, a operação das válvulas é feita de maneira antecipada aos eventos ocorrentes no reservatório. Como resultado, foi alcançado um VPL superior ao caso reativo, confirmando resultados presentes em outros estudos. Esse ganho de desempenho do VPL foi possível devido ao aumento de produção de óleo e redução da água de injeção, quando comparado ao caso reativo.

O número de simulações para esta última etapa foi suficiente para o propósito deste estudo: demonstrar o ganho de desempenho do controle proativo das ICVs em comparação com o controle reativo. No entanto, para resultados ainda mais otimizados e refinados, esse número de simulações pode ser aumentado em estudos futuros.

De modo um geral, o uso da completação inteligente para este modelo sintético de reservatório, o CERENA-I, é recomendado devido ao bom retorno financeiro do investimento. Entretanto alguns aspectos podem ser melhorados ou desenvolvidos nos próximos estudos envolvendo a viabilidade do uso das ICVs. Para um melhor dimensionamento do desempenho real da implementação da completação inteligente, a metodologia pode ser expandida para uma escala de campo, aumentando o número de poços produtores e injetores e, conseqüentemente, o número de válvulas

instaladas e o número de parâmetros a ser otimizado. Um outro ponto que pode ser estudado futuramente neste modelo é o uso de outros tipos de operação de válvulas, como os tipos multiposição e contínuo (com alta discretização da porcentagem de abertura da válvula). Estes tipos podem proporcionar uma otimização mais eficaz do controle das ICVs, no entanto, por possuírem um número muito maior de parâmetros a ser otimizado, o custo computacional para o processo será bem maior quando comparado ao modo de operação binário.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAYEV, A., KEDIA, R., URAKOV, A., & TEMIZEL, C. **Optimization of Recovery Using Intelligent Completions in Intelligent Fields**. Society of Petroleum Engineers. Annual Caspian Technical Conference and Exhibition held, Baku, Azerbaijan, 2017.
- ABREU, A. C. A., BOOTH, R., BERTOLINI, A., PRANGE, M., BAILEY, W. J., TEIXEIRA, G., EMERICK, A., PACHECO, M. A. **Proactive and Reactive Strategies for Optimal Operational Design: An Application in Smart Wells**. Offshore Technology Conference, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
- ALMEIDA, L. F.; VELLASCO, M. M. B. R.; PACHECO, M. A. C. **Optimization system for valve control in intelligent wells under uncertainties**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 73, p. 129-140, 2010.
- EMERICK, A.; PORTELLA, R. **Production Optimization With Intelligent Wells**. SPE 107261, 2007 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, 2007.
- FABUSUYI, J. **Optimization of a Water Alternating Gas Injection Compositional fluid flow simulation with Water Alternating Gas Injection optimization on the upscaled synthetic reservoir CERENA-I**. Engenharia de Petróleo, Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2015, 73p. Dissertação (Mestrado).
- GASPAR, A. T. F. S.; BARRETO, C. E. A. G.; SCHIOZER, D. J. **Assisted process for design optimization of oil exploitation strategy**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 146, p. 473–488, 2016.
- GUO, B.; SUN, K.; GHALAMBOR, A. (2008). **Well Productivity Handbook - Vertical, Fractured, Horizontal, Multilateral, and Intelligent Wells**. Gulf Publishing Company. Houston, Estados Unidos, p. 247, 2008.
- HAYASHI, S. H. D. **Valor da Flexibilização e Informação em Desenvolvimento de Campo por Módulos**. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2006, 138p. Dissertação (Mestrado).
- ILAMAH, O., & WATERHOUSE, R. (2018, June 8). **Field-Scale Production Optimization with Intelligent Wells**. 80th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, Copenhagen, Dinamarca, Junho, 2018
- MADEIRA, P. T. **Dynamic simulation on the synthetic reservoir CERENA I Compositional fluid flow simulation with 4D seismic monitoring on a reservoir with a large content of CO₂**. Engenharia de Petróleo, Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2014, 76p. Dissertação (Mestrado).
- MOREIRA, J. I.; MADEIRA, C.V.; GIL, J.A.; MACHADO M.A.. **Bacia de Santos**. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15 , p. 531-549, 2007.

NAUS, M.; DOLLE, N.; JANSEN, J.-D. **Optimization of Commingled Production Using Infinitely Variable Inflow Control Valves**. SPE Production & Operations, v. 21, pp 293-301, Maio, 2006.

PINTO, M. A. S. **Método de otimização assistido para comparação entre poços convencionais e inteligentes considerando incertezas**. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2013, 196p. Tese (Doutorado).

Pré-Sal Petróleo S.A. (PPSA). Polígono do Pré-sal. Disponível em: <<http://www.presalpetroleo.gov.br>> Acesso em: 11 out. 2018.

RENPU, W. **Advanced Well Completion Engineering**. 3ª Edição. Petroleum Industry Press. Oxford, Reino Unido, p. (110, 111), 2011.

SAMPAIO, M. A.; BARRETO, C. E. A. G.; SCHIOZER, D. J. **Optimization of Proactive Control Valves of Producer and Injector Smart Wells under Economic Uncertainty**. 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, Copenhagen, Dinamarca, Junho, 2012

SAMPAIO, M. A.; BARRETO, C. E. A. G.; SCHIOZER, D. J. Assisted optimization method for comparison between conventional and intelligent producers considering uncertainties. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 133, p. 268–279, 2015.

SILVA, J. P. Q. G. **Uso de Poços Inteligentes em Desenvolvimento de Campos de Petróleo sob Incertezas**. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2009, 118p. Dissertação (Mestrado).

TÚPAC, Y. J. **Sistema Inteligente de Otimização de Alternativas de Desenvolvimento de Campos Petrolíferos**. Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005, 138p. Tese (Doutorado).

YETEN, B.; DURLOFSKY, L. J.; AZIZ, K. **Optimization of Smart Well Control**. SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and International Horizontal Well Technology Conference, Alberta, Canada, November, 2002.

APÊNDICE A—Cronograma

| | Março/2018 | Abril/2018 | Maio/2018 | Junho/2018 | Julho/2018 | Agosto/2018 | Setembro /2018 – Agosto/2019 | Setembro/2019 | Outubro/2019 |
|--|------------|------------|-----------|------------|------------|-------------|------------------------------|---------------|--------------|
| Escolha do tema e orientador | | | | | | | | | |
| Revisão da bibliografia sobre o tema | | | | | | | | | |
| Estudo sobre o Modelo CERENA-I | | | | | | | | | |
| Estudo sobre o uso dos <i>softwares</i> de simulação pertencentes ao CMG | | | | | | | | | |
| Estudo sobre a completação inteligente e influência do WCUT _{Limit} | | | | | | | | | |
| Desenvolvimento da metodologia | | | | | | | | | |
| Confecção do trabalho parcial | | | | | | | | | |
| Representação das válvulas inteligentes no simulador | | | | | | | | | |
| Otimização do número de ICVs e do WCUT _{Limit} ideal para cada zona | | | | | | | | | |
| Análise dos resultados obtidos | | | | | | | | | |
| Conclusão e entrega do Trabalho Final | | | | | | | | | |

Legenda



Concluído

Em andamento

Etapa Futura

** Período de Aproveitamento de Estudos no IST-Lisboa



Otimização da completação inteligente aplicada a reservatórios carbonáticos

João Victor Gois Silva

Orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto Sampaio Pinto

Artigo Sumário referente à disciplina PMI1096 – Trabalho de Formatura para Engenharia de Petróleo II
Este artigo foi preparado como requisito para completar o curso de Engenharia de Petróleo na Escola Politécnica da USP.

Resumo

O presente trabalho busca mitigar um dos problemas que podem reduzir o lucro obtido: a excessiva produção de água nos poços produtores. Como solução, surge a completação inteligente, que permite o controle de parâmetros de produção, como pressão e produção de água, em tempo real através de um sistema composto por válvulas e sensores instalados no poço e controlados na superfície. Através de simulações computacionais, será feito um estudo de caso envolvendo um *Five-spot* com 4 poços injetores e 1 produtor construído no CERENA-I, um modelo sintético carbonático de reservatório com características semelhantes ao Pré-Sal. Neste estudo, instala-se um sistema de completação inteligente no poço produtor buscando a melhor configuração entre as válvulas inteligentes, ou seja, otimizando o número, o posicionamento e, principalmente, o controle destas válvulas durante o período de produção, realizado através da definição do corte de água ($WCUT_{Limit}$, do inglês, Water Cut Limit). Assim, espera-se reduzir a produção de água em cada zona do reservatório, prolongar a vida útil do poço evitando o fechamento precoce do mesmo e reduzir os custos operacionais derivados do processamento de água na plataforma. Deste modo, será possível justificar os investimentos adicionais em completação inteligente e, principalmente, maximizar o VPL obtido na produção do campo, que é a função objetivo para se construir a melhor estratégia de produção. Os resultados do estudo mostraram-se satisfatórios para os controles reativo e proativo, reduzindo a quantidade de água produzida e, ao mesmo tempo, aumentando a produção de óleo.

Palavras-Chave: Simulação de reservatórios. Completação inteligente. Otimização do corte de água.

Abstract

The present work seeks to mitigate one of the problems that can reduce the profit obtained: the excessive production of water in the producing wells. As a solution, there is the intelligent completion, which allows the control of production parameters, such as pressure and water production, in real time through a system composed of valves and sensors installed in the well and controlled on the surface. Through computer simulations, a case study involving a *Five-spot* with four injector wells and a producer constructed in the CERENA-I, a synthetic carbonate model of reservoir with characteristics like the Pre-Salt will be done. In this study, an intelligent completion system is installed in the production well, seeking the best configuration among the intelligent valves, that is, optimizing the number, positioning and, especially, the control of this valves during the production time, realized through the Water Cut Limit ($WCUT_{Limit}$) definition. Thus, it is expected to reduce the production of water in each zone of the reservoir, to prolong the useful life of the well, avoiding the early closing of the well and to reduce the operational costs derived from the processing of water in the platform. In this way, it will be possible to justify the

additional investments in intelligent completion and, mainly, to maximize the NPV obtained in field production, which is the objective function to build the best production strategy. The study results shown itself satisfactory for the reactive and proactive controls, reducing the among of produced water and, in the same time, increase the oil production.

Keywords: Simulation of reservoirs. Smart completion. Optimization of water cut.

1. Introdução

O desenvolvimento do campo é pautado para resolver alguns desafios: aumento da recuperação de óleo, redução da produção de água, diminuição do número de intervenções no poço e, o mais importante, a maximização do VPL do campo. Para atingir os desafios citados, novos conceitos e tecnologias estão sendo estudados. Entre estas, uma das mais promissoras é a “Completação Inteligente”, tecnologia que possibilita o monitoramento e o controle da produção de hidrocarbonetos por meio de um sistema que permite que a abertura das válvulas do poço seja ajustada e, além disso, que os dados em tempo real sejam adquiridos sem qualquer intervenção de poço.

De acordo com Silva (2009), a completção inteligente consiste na incorporação de sensores de fundo de poço permanentes e válvulas de controle de vazão controladas por superfície, permitindo monitoramento e controle. Esse sistema possui algumas vantagens de caráter estratégico, tais como:

- Monitoramento zonal em tempo real de pressões e temperaturas.
- A produção de múltiplas zonas, controlada por superfície em cada uma destas visando otimizar a produção e o gerenciamento do reservatório.
- Redução da produção de água ou gás indesejável.
- Aumento da recuperação e prolongamento da vida econômica do poço.
- Possibilidade da realização de testes de produção de zonas individuais sem intervenções e com interrupção de produção mínima.
- Controle da distribuição da injeção de água ou gás nas diferentes camadas do reservatório.

No panorama brasileiro sabe-se que o gerenciamento da produção em águas profundas e ultra profundas é muito mais complexo que em águas rasas, e é, justamente onde os principais projetos estão concentrados, na região do Pré-Sal. Além disso, segundo Moreira (2007) os reservatórios presentes na área do Pré-Sal são predominantemente carbonáticos, diferentemente dos demais reservatórios brasileiros, como os da Bacia de Campos, onde são de característica arenítica. Logo, novos desafios operacionais devidos a essa diferença estão presentes, por exemplo, a produção em reservatórios heterogêneos e compartimentados em múltiplas zonas. Devido a estes desafios, o uso da completção inteligente ainda necessita de estudos na busca da otimização e viabilidade econômica da sua aplicação.

Em alguns trabalhos anteriores foram aplicadas diferentes metodologias de otimização da completção inteligente. Estes estudaram soluções em comum que englobam a implementação e parametrização das válvulas inteligentes no simulador, além dos algoritmos de busca por solução otimizada.

Em relação a implementação do sistema de válvulas inteligentes no simulador de reservatórios, Yeten et al. (2002) e Sampaio et al. (2012) aplicaram uma modelagem binária (on/off) para a representação, Emerick e Portella (2007) utilizaram válvulas do tipo multiposição e Almeida et al. (2010) conseguiram implementar válvulas do tipo contínua, as quais requerem um maior custo computacional.

Já se tratando dos algoritmos de busca por solução otimizada, Yeten et al. (2002) propôs uma metodologia baseada no uso de gradientes conjugados. Naus et al. (2006), por sua vez, fez uso de uma metodologia baseada em programação linear sequencial SLP (do inglês, Sequential Linear Programming), já em Emerick e Portella (2007) foi proposto um método de otimização baseado num algoritmo de busca direta. Nos últimos trabalhos houve uma preferência pelo uso de algoritmos genéticos devido a eficiência

na busca por soluções globais, como em Almeida et al. (2010) e Sampaio et al. (2012), ou mesmo o uso de uma abordagem híbrida como em Abreu et. al. (2015), utilizando os algoritmos genéticos para busca de soluções globais e um método assistido para busca de soluções ótimas locais.

Esse trabalho tem o intuito de contribuir através de uma metodologia que otimize o funcionamento do controle de válvulas na completção inteligente em um modelo reduzido de reservatório carbonático com 4 poços injetores e 1 produtor visando a redução da produção de água e o aumento da produção de óleo. Deste modo, maximizando o VPL do campo.

2. Metodologia

Nesta parte do presente trabalho, serão apresentadas, de maneira clara e objetiva, todas as etapas necessárias ao estudo de caso desenvolvido. Etapas estas que vão desde a representação do sistema de válvulas inteligentes no simulador de reservatório até a definição da função objetivo do estudo. Para o presente estudo, será utilizado um esquema *Five-spot* para a configuração da produção: 4 poços injetores nas extremidades e 1 poço produtor no centro. Destacando que o uso das válvulas inteligentes será feito apenas no poço produtor. Para o desenvolvimento deste estudo, serão utilizados os seguintes *Softwares* do pacote CMG (do inglês, Computer Modelling Group).

2.1. Representação das válvulas de completção inteligente no CMG

Devido à falta de um recurso para a representação direta do sistema de válvulas inteligentes no simulador de reservatório CMG, neste trabalho será utilizado um artifício indireto para o propósito. Este artifício consistirá em representar o poço produtor inteligente através do controle individual de cada camada do modelo, ou através de agrupamento de algumas destas camadas a depender da configuração das ICVs dentro do poço. A representação das válvulas será possível através dos comandos TRIGGER e LAYER-CTRL, o quais são capazes de condicionar a abertura de determinada camada do poço a um parâmetro específico, nesse caso o corte de água (WCUT).

2.2. Otimização do Número e Posicionamento das Válvulas

Inicialmente, serão implementadas válvulas inteligentes (ICVs) do tipo binária em todas as camadas completadas do modelo. Utilizando o valor de $WCUT_{limit}$ definido na etapa anterior, uma nova simulação será executada, medindo os tempos de fechamento para cada uma das camadas do poço produtor. Então, na sequência, as camadas vizinhas serão agrupadas uma a uma de acordo com a proximidade dos respectivos tempos de fechamentos, ou seja, se duas camadas possuírem o mesmo tempo de fechamento ou valores muito próximos, deverão ser agrupadas em uma única válvula ICV. Deste modo, serão geradas configurações com diferentes números de válvulas: saindo de um número $(n-1)$ de válvulas utilizadas até 2 válvulas, sendo n o número total de camadas completadas inicialmente. Após esta etapa de agrupamento, todas as configurações serão simuladas gerando um valor de VPL diferente para cada uma e, consequentemente, a configuração com maior VPL encontrado será o resultado desta etapa de otimização.

2.3. Otimização do controle de válvulas

Nesta etapa do trabalho, o objetivo será obter a melhor configuração para cada válvula ICV, ou seja, aquela que maximizará o VPL do campo. Portanto, serão otimizadas as condições de abertura/fechamento de cada uma das válvulas inteligentes em cada período estabelecido, neste estudo o controle será otimizado em períodos de 2 anos num tempo total de produção de 30 anos. Assim, possibilita-se um modo de ação proativo em relação ao controle das válvulas, ou seja, prevendo os fenômenos que irão ocorrer no reservatório e agindo de maneira antecipada, aumentando a produção e evitando um fechamento total

precoce da zona controlada pela ICV. Neste trabalho, será desenvolvido um método composto por algoritmos genéticos, procurando soluções globais e em seguida um método assistido, que atuará periodicamente na busca da configuração ideal entre as válvulas. Na Figura 1, o fluxograma de trabalho para essa etapa de trabalho pode ser observado.

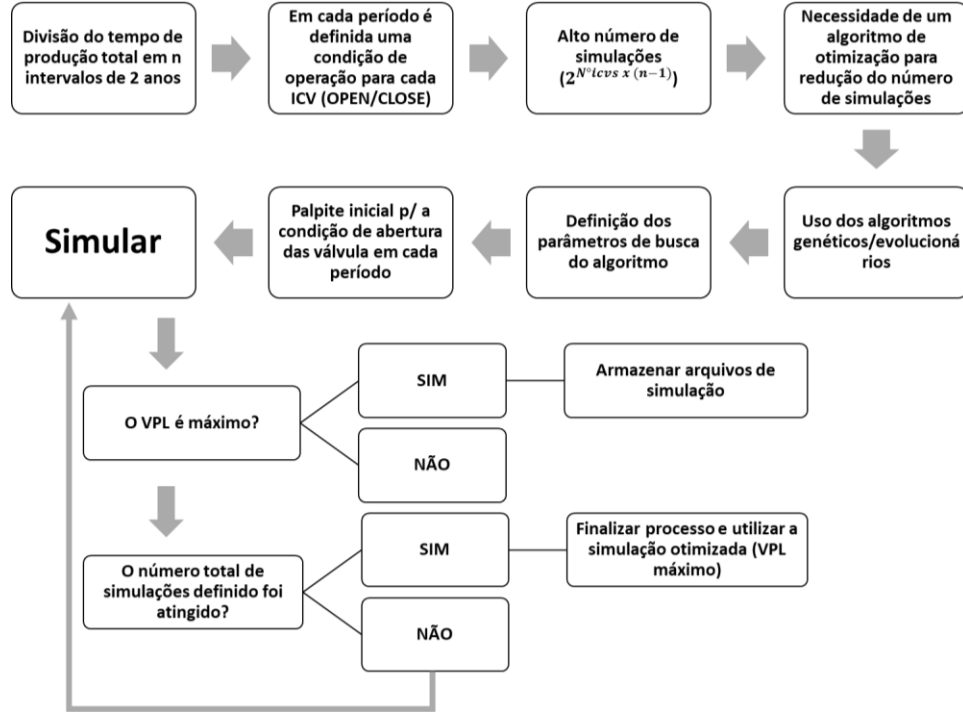


Figura 1: Esquema ilustrativo para o processo de otimização do controle de válvulas

2.4. Avaliação econômica determinística

Por fim, para quantificar os ganhos com a otimização da completção inteligente, será feita uma avaliação econômica com parâmetros determinísticos, ou seja, admitindo um cenário econômico fixo. Portanto, é nesta etapa da metodologia que a função objetivo será descrita: a maximização do VPL. Assim, o fluxo de caixa será construído considerando todos os custos operacionais e de capital, o sistema tributário brasileiro e as receitas com a produção de óleo.

Assim como definido em trabalhos anteriores como em Gaspar, Barreto e Schiozer (2016) e Pinto (2013), o VPL pode ser obtido através das seguintes relações de fluxo de caixa descontado:

$$VPL = \sum_{k=1}^{nt} \frac{FC_{tk}}{(1+r)^{tk}} \quad (9)$$

$$FC_{tk} = (RO)_i - (CO)_i - (ROY)_i - (PPC)_i - (IR)_i - (CS)_i - (I_{total})_i \quad (10)$$

Sendo VPL, o Valor presente líquido do campo, FC_{tk} , o Fluxo de caixa no tempo k e r , a taxa de desconto. Na calculo do fluxo de caixa são considerados: $(I_{total})_i$ investimento total, $(CO)_i$ custo operacional, $(RO)_i$ receita operacional, $(ROY)_i$ Royalties, $(PPC)_i$ PIS/PASEP COFINS, $(IR)_i$ imposto de renda, $(CS)_i$ contribuição social, todos definidos no tempo i .

3. Estudo de Caso

3.1. Modelo CERENA-I

O modelo sintético CERENA-I foi desenvolvido com o intuito de reproduzir as características dos reservatórios carbonáticos presentes nos campos de produção do Pré-Sal. Além disso, possui um conjunto de dados de alta resolução de propriedades petrofísicas e petroelásticas, aumentando o grau de realidade da simulação. As dimensões da malha utilizada para a construção do modelo foram 161x161x300 blocos, com 25x25x1m de espaçamento. Quanto às características de porosidade e permeabilidade do reservatório, serão utilizados os parâmetros originais do modelo CERENA-I. Não foram disponibilizados os valores e formas de cálculo explicitamente para estas características, entretanto pode-se visualizar a distribuição destas no modelo nas Figuras Figura 2 e Figura 3.

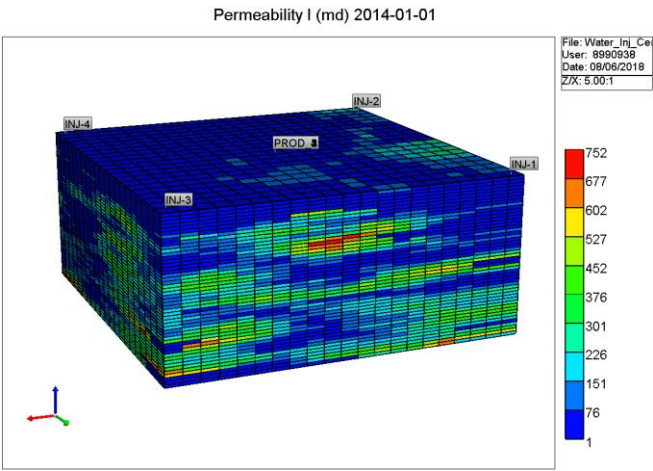


Figura 2: Permeabilidade do Modelo

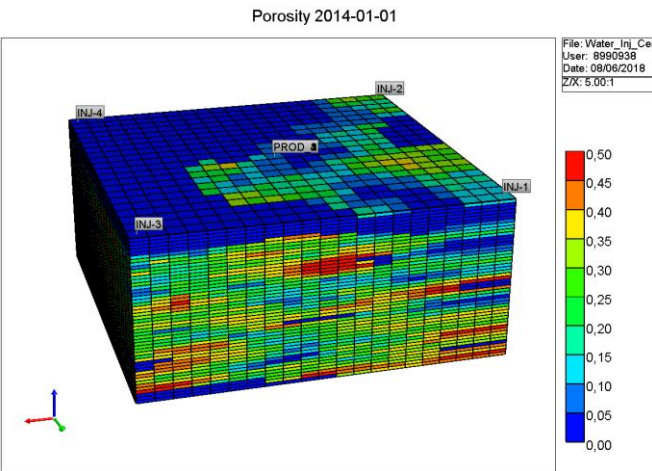


Figura 3: Porosidade do Modelo

3.2. Definição dos parâmetros de operação de poço

Para fins de padronização, os poços injetores 1, 2, 3 e 4 possuem uma zona de injeção no reservatório com comprimento de 60 m, 70m, 70m e 60m, respectivamente. Além disso foram definidas algumas condições de operação, as quais podem ser vistas nas Tabelas Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1: Condições operacionais para o poço produtor

| Parâmetro de controle | Valor |
|--|--------------|
| Mínima Pressão de Fundo de Poço (BHP min) | 45400 KPa |
| Máxima Vazão de Líquidos na Superfície (STL max) | 12000 m³/dia |

Tabela 2: Condições operacionais para os 4 poços injetores

| Parâmetro de controle | Valor |
|--|--------------|
| Máxima Pressão de fundo de poço máxima (BHP max) | 64121.2 KPa |
| Máxima Vazão Água na Superfície (STW max) | 10000 m³/dia |

Estes parâmetros permanecerão constantes durante todo o processo de simulação a ser realizado. Um outro detalhe para os poços injetores é que estes iniciam o período de produção inativos e são ativados através de uma condição de Mínima Pressão de Campo de 49299.6 Kpa, ou seja, quando a média das Pressões de Fundo dos poços (BHP) é menor que o valor definido, os injetores são automaticamente abertos.

3.3. Definição do cenário econômico determinístico

Neste estudo, para avaliar o potencial econômico do campo, será utilizado um cenário determinístico, o qual pode ser observado nas tabelas Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5 a seguir.

Tabela 3: Cenário econômico determinístico

| Parâmetro | Valor |
|--|--------------|
| Preço do óleo (US\$/m ³) | 257.9 |
| Custo da produção de óleo (US\$/m ³) | 48.57 |
| Custo da produção de água (US\$/m ³) | 4.86 |
| Custo da injeção de água (US\$/m ³) | 4.86 |
| Taxa de desconto anual (% a.a.) | 9 |
| Custo da produção de gás (US\$/m ³) | 0.013 |

Tabela 4: Regime Fiscal Brasileiro

| Parâmetro | Valor |
|---------------------|--------------|
| Royalties | 10% |
| PIS/Confins | 9,25% |
| Contribuição Social | 9% |
| Imposto de Renda | 25% |

Tabela 5: Custo de implementação da Completção Inteligente

| Parâmetro | Valor |
|--|------------|
| Custo de instalação da Completção Inteligente (MMUS\$) | 1 |
| Valor para cada Válvula ICV adicional (MMUS\$) | 0,3 |

4. Resultados

Nesta seção serão apresentados de maneira sucinta os resultados obtidos através do estudo de caso apresentado.

4.1. Otimização do Número e Posicionamento das Válvulas

Como proposto na metodologia inicial, foi feita uma otimização inicial para o poço com válvulas em todas as zonas com dois intuitos principais: encontrar o Wcut ótimo de funcionamento e descobrir o tempo de fechamento de cada zona para o agrupamento da etapa seguinte. Após a otimização inicial, é possível alcançar um VPL ótimo de MMUS\$ 394,51 utilizando um WCUT_{Limit} de 0,8049 para todas as camadas completadas do poço.

Assim, tomando como referência este modelo com WCUT otimizado, foi possível verificar o tempo de fechamento de cada camada individualmente e, portanto, realizar a etapa seguinte de agrupamento das zonas com comportamento semelhante. Portanto, de acordo com a metodologia, é possível agrupar as zonas com tempos de fechamento iguais ou próximos, camada por camada, gerando 5 diferentes configurações de número de válvulas. Foram simuladas todas as 5 configurações anteriores, comparando ao caso base do poço convencional. Os resultados em termos de produção e rentabilidade podem ser observados na Tabela 6. Sendo, Np a produção de óleo acumulada, Wp a produção de água acumulada e Winj a quantidade total de água injetada. Analisando a tabela, nota-se a configuração ótima que será

utilizada na etapa seguinte deste trabalho: a configuração de 3 válvulas, a qual alcançou o maior incremento em termos de VPL.

Tabela 6: Resultados econômicos e de produção para cada configuração

| Configuração | ΔN_p (m ³) | ΔN_w (m ³) | ΔN_i (m ³) | ΔVPL (MMUS\$) |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 2 válvulas | 3,79E+05 | -4,22E+06 | 1,92E+06 | 35,94 |
| 3 válvulas | 4,65E+05 | -4,93E+06 | 2,23E+06 | 37,95 |
| 4 válvulas | 1,77E+05 | -5,40E+06 | 2,83E+06 | 33,23 |
| 5 válvulas | -2,03E+05 | -5,87E+06 | 2,02E+06 | 8,71 |
| 6 válvulas | -2,58E+05 | -5,90E+06 | 1,90E+06 | 4,60 |

Analisando o gráfico da Figura 4, observa-se num primeiro momento o fechamento da ICV 3, seguida pelo fechamento da ICV 2. Este resultado está dentro do esperado visto que a saturação de água tende a aumentar de baixo para cima, devido ao maior valor de densidade da água, ou seja, as zonas mais profundas atingem o $WCUT_{Limit}$ mais rapidamente.

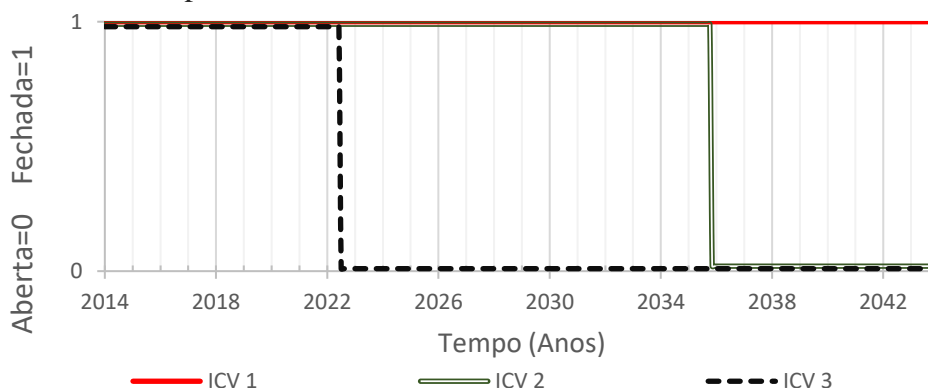


Figura 4: Configuração de Abertura/Fechamento das 3 válvulas ICVs em uso

4.2. Otimização do controle de Válvulas

Com o número e o posicionamento das ICVs definidos e otimizados, é possível otimizar o controle destas válvulas durante o período de produção. Na etapa anterior, foi utilizado um controle do tipo reativo, ou seja, que fecha a válvula após o $Wcut$ ser atingido, já nesta etapa, será feito um controle proativo das ICVs, buscando uma maneira mais eficiente ainda de produção.

Inicialmente, será adotada uma configuração de válvula do tipo binária (abre e fecha) devido ao alto custo computacional para o processo de otimização. Sendo assim, o tempo de produção será dividido em 15 períodos de 2 anos e no final de cada um desses períodos as ICVs poderão ser reconfiguradas de modo a otimizar a produção. Como a produção de água da ICV1 é pequena e não passa o $Wcut$ em nenhum momento, a válvula será considerada aberta em todo o processo, reduzindo o número de parâmetros e o custo computacional. Deste modo, serão 28 parâmetros a serem otimizados no total, o que pode ser observado na Tabela 7. Neste trabalho será utilizado o “Algoritmo Genético” com a seguinte configuração da Tabela 8.

Tabela 7: Palpite inicial da configuração de abertura entre as ICVs

| Válvula | Ano inicial para cada Período Produtivo | | | | | | | | | | | | | |
|---------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2016 | 2018 | 2020 | 2022 | 2024 | 2026 | 2028 | 2030 | 2032 | 2034 | 2036 | 2038 | 2040 | 2042 |
| ICV2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| ICV3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tabela 8: Parâmetros operacionais de busca do algoritmo genético/evolucionário

| Parâmetro | Valor |
|--|-------|
| Nº Total de Simulações | 2500 |
| Fator de Mutação (F) | 0,3 |
| Taxa de Crossover (Cr) | 0,7 |
| Tamanho da População (N _{pop}) | 50 |

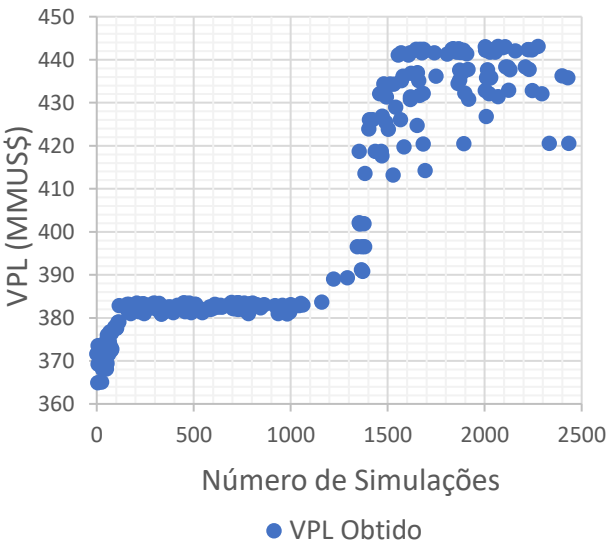


Figura 5: Evolução do VPL de acordo as simulações comandadas pelo algoritmo

Deste modo, executando o processo de simulação foi possível chegar a um VPL otimizado de MMUS\$ 443,13 após 2500 simulações corridas. No gráfico da Figura 5, observa-se o comportamento do processo de otimização. Na Tabela 9 é feita a comparação entre os tipos os dois tipos controle, Reativo e Proativo, e o caso base do poço convencional.

Tabela 9: Comparação entre os resultados econômicos e de produção

| Controle | ΔN_p (m³) | ΔN_w (m³) | ΔN_i (m³) | ΔVPL (MMUS\$) |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| Reativo | 4,65E+05 | -4,93E+06 | 2,23E+06 | 37,95 |
| Proativo | 5.75E+05 | -3.16E+06 | 8.98E+05 | 45.57 |

Analisando os resultados, nota-se um aumento de VPL significativo para o controle proativo que pode ser explicado pelo bom ganho na produção de óleo e pela redução da injeção de água, mesmo com uma menor redução da produção de água. Isso se deve ao fato de o controle proativo agir de maneira antecipada aos fenômenos dentro do reservatório, e deste modo, priorizar sempre as camadas do poço com maior potencial produtivo.

Analisando os gráficos das Figuras Figura 6 e Figura 7, observa-se um aumento na produção de óleo do controle proativo logo no início da período em 2016, paralelamente no mesmo período, a produção de água é levada a zero e depois aumenta em concordância com o aumento da produção de óleo. Esta configuração particular do controle proativo se mostrou eficiente no cumprimento da função objetivo, pois

foi capaz de aumentar a produção de óleo e reduzir a produção de água num período inicial, que é o mais influente para o fluxo de caixa em termos de valor presente, maximizando desta forma o VPL total do modelo estudado. Esse fato é relacionado a previsão dos fenômenos do reservatório, possibilitada através do controle proativo.

Figura 6: Gráfico comparativo entre as Vazões de Produção de Óleo

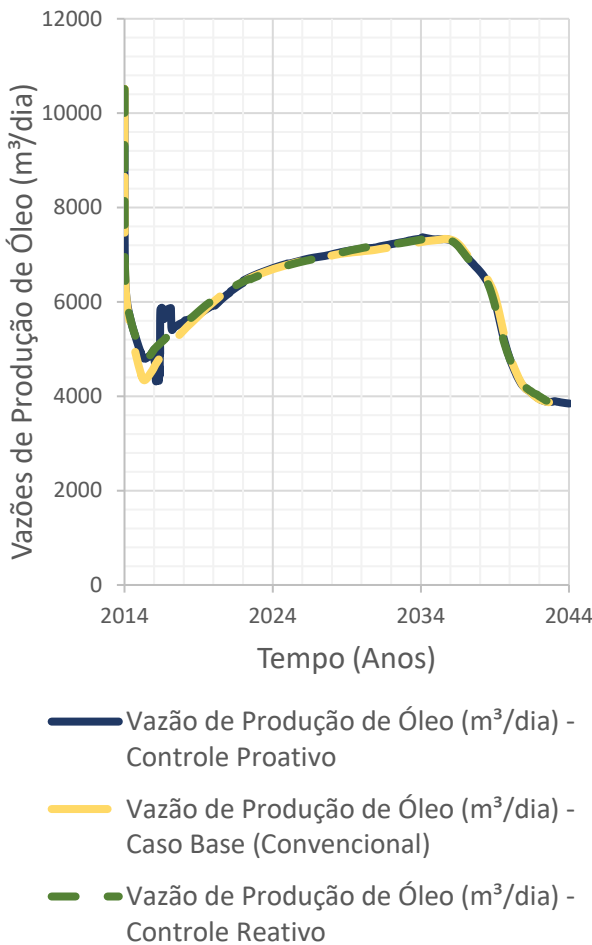
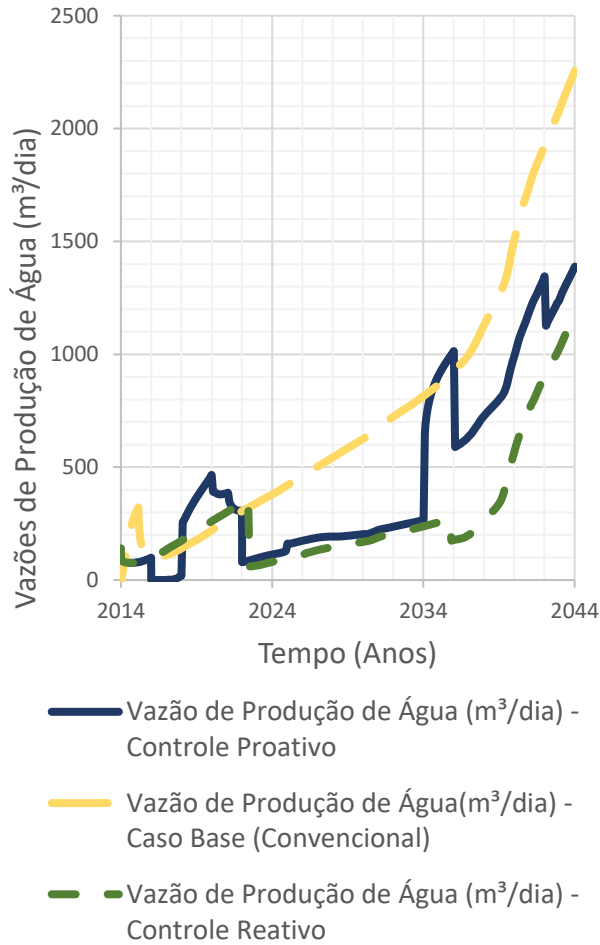


Figura 7: Gráfico comparativo entre as Vazões de Produção de Água



Atrelando a análise gráfica da produção com a redução da quantidade de água injetada presente na Tabela 9, uma das possíveis conclusões é que houve uma manutenção da pressão de fundo do poço mais eficiente do que nos casos anteriores, ou seja, foi possível prever as correntes de fluxo de água no reservatório, evitando assim a produção da água de injeção. Além disso num aspecto geral, apresentou uma boa redução da água produzida em comparação com o caso base, porém menor que no controle reativo, aspecto este que foi compensado pelo ganho de produção de óleo pelo controle proativo. No gráfico da Figura 8, é possível observar detalhadamente os momentos de abertura e fechamento das válvulas utilizadas durante a produção.

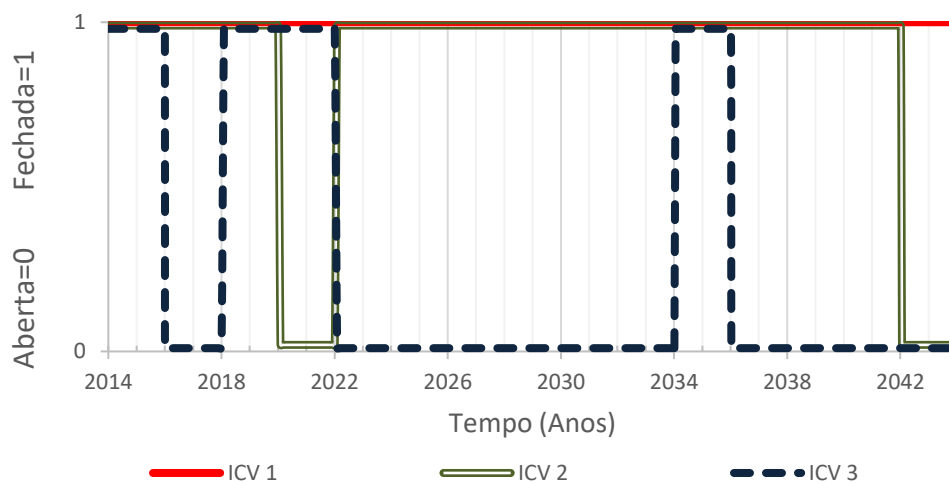


Figura 8: Configuração de Abertura/Fechamento das ICVs no controle proativo

5. Conclusão

Como conclusão deste trabalho, alcançou-se o objetivo de desenvolvimento de uma metodologia, a qual otimiza o funcionamento do controle de válvulas na completção inteligente, visando a redução da produção de água e o aumento da produção de óleo. O estudo foi feito em um modelo reduzido de reservatório carbonático com 4 poços injetores e 1 produtor.

Após o aprimoramento da metodologia, foi possível realizar completamente a primeira etapa do trabalho, a otimização do número e do posicionamento das válvulas, gerando resultados que estavam dentro do esperado. Para o poço produtor em estudo, após a etapa de agrupamento das camadas sob o comando das respectivas válvulas, a configuração otimizada foi a que possui 3 válvulas atingindo o maior VPL. Deste modo, foi possível chegar a um controle do tipo reativo totalmente otimizado, viabilizando o início da próxima etapa da metodologia: a otimização do controle das válvulas.

Para a etapa de otimização do controle das válvulas, com o número e o posicionamento das ICVs definidos, pôde-se aplicar um novo tipo de controle: o proativo. Neste modo de controle, a operação das válvulas é feita de maneira antecipada aos fenômenos ocorrentes no reservatório. Como resultado, foi alcançado um VPL superior ao caso reativo, confirmando resultados presentes em outros estudos. Esse ganho de performance do VPL foi possível devido ao aumento de produção de óleo e redução da água de injeção, quando comparado ao caso reativo.

O número de simulações para esta última etapa foi suficiente para o propósito deste estudo: demonstrar o ganho de performance do controle proativo das ICVs em comparação com o controle reativo. No entanto, para resultados ainda mais otimizados e refinados, esse número de simulações pode ser aumentado em estudos futuros.

De modo um geral, o uso da completção inteligente para este modelo sintético de reservatório, o CERENA-I, é recomendado devido ao bom retorno financeiro do investimento.

6. Referências

- ABDULLAYEV, A., KEDIA, R., URAKOV, A., & TEMIZEL, C. **Optimization of Recovery Using Intelligent Completions in Intelligent Fields**. Society of Petroleum Engineers. Annual Caspian Technical Conference and Exhibition held, Baku, Azerbaijan, 2017.
- ABREU, A. C. A.; BOOTH, R.; BERTOLINI, A.; PRANGE, M.; BAILEY, W. J.; TEIXEIRA, G.; EMERICK, A.; PACHECO, M. A. **Proactive and Reactive Strategies for Optimal Operational Design: An Application in Smart Wells**. Offshore Technology Conference, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
- ALMEIDA, L. F.; VELLASCO, M. M. B. R.; PACHECO, M. A. C. **Optimization system for valve control in intelligent wells under uncertainties**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 73, p. 129-140, 2010.
- EMERICK, A.; PORTELLA, R. **Production Optimization With Intelligent Wells**. SPE 107261, 2007 SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, 2007.
- GASPAR, A. T. F. S.; BARRETO, C. E. A. G.; SCHIOZER, D. J. **Assisted process for design optimization of oil exploitation strategy**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 146, p. 473-488, 2016.
- GUO, B.; SUN, K.; GHALAMBOR, ALI. (2008). **Well Productivity Handbook - Vertical, Fractured, Horizontal, Multilateral, and Intelligent Wells**. Gulf Publishing Company. Houston, Estados Unidos, p. 247, 2008.
- HAYASHI, S. H. D. **Valor da Flexibilização e Informação em Desenvolvimento de Campo por Módulos**. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2006, 138p. Dissertação (Mestrado).
- ILAMAH, O., & WATERHOUSE, R. (2018, June 8). **Field-Scale Production Optimization with Intelligent Wells**. 80th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, Copenhagen, Dinamarca, Junho, 2018
- MADEIRA, P. T. **Dynamic simulation on the synthetic reservoir CERENA I Compositional fluid flow simulation with 4D seismic monitoring on a reservoir with a large content of CO₂**. Engenharia de Petróleo, Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2014, 76p. Dissertação (Mestrado).
- MOREIRA, J. I.; MADEIRA, C.V.; GIL, J.A.; MACHADO M.A.. **Bacia de Santos**. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15, p. 531-549, 2007.
- NAUS, M.; DOLLE, N.; JANSEN, J.-D. **Optimization of Commingled Production Using Infinitely Variable Inflow Control Valves**. SPE Production & Operations, v. 21, pp 293-301, Maio, 2006.
- PINTO, M. A. S. **Método de otimização assistido para comparação entre poços convencionais e inteligentes considerando incertezas**. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2013, 196p. Tese (Doutorado).
- Pré-Sal Petróleo S.A. (PPSA). Polígono do Pré-sal. Disponível em: <<http://www.presalpetroleo.gov.br>> Acesso em: 11 out. 2018.
- RENPU, W. **Advanced Well Completion Engineering**. 3ª Edição. Petroleum Industry Press. Oxford, Reino Unido, p. (110, 111), 2011.
- SAMPAIO, M. A.; BARRETO, C. E. A. G.; SCHIOZER, D. J. **Optimization of Proactive Control Valves of Producer and Injector Smart Wells under Economic Uncertainty**. 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, Copenhagen, Dinamarca, Junho, 2012
- SAMPAIO, M. A.; BARRETO, C. E. A. G.; SCHIOZER, D. J. Assisted optimization method for comparison between conventional and intelligent producers considering uncertainties. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 133, p. 268-279, 2015.
- SILVA, J. P. Q. G. **Uso de Poços Inteligentes em Desenvolvimento de Campos de Petróleo sob Incertezas**. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2009, 118p. Dissertação (Mestrado).
- TÚPAC, Y. J. **Sistema Inteligente de Otimização de Alternativas de Desenvolvimento de Campos Petrolíferos**. Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005, 138p. Tese (Doutorado).
- YETEN, B.; DURLOFSKY, L. J.; AZIZ, K. et al. **Optimization of Smart Well Control**. SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and International Horizontal Well Technology Conference, Alberta, Canada, November, 2002.