



CARLOS EDUARDO ANDRADE GOMES BARRETO

METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO PARA AVALIAÇÃO
DO USO DE VÁLVULAS DE CONTROLE EM POÇOS NA
SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PRODUÇÃO

CAMPINAS

2014



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARLOS EDUARDO ANDRADE GOMES BARRETO

METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DO USO DE VÁLVULAS DE CONTROLE EM POÇOS NA SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PRODUÇÃO

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Ciências e Engenharia de Petróleo na área de Reservatórios e Gestão.

Orientador: Prof. Dr. Denis José Schiozer

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida pelo aluno Carlos Eduardo Andrade Gomes Barreto, e orientada pelo Prof. Dr. Denis José Schiozer.

A handwritten signature in blue ink is written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to be "D. Schiozer".

CAMPINAS
2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

B275m Barreto, Carlos Eduardo Andrade Gomes, 1981-
Metodologia de otimização para avaliação do uso de válvulas de controle em poços na seleção de estratégia de produção / Carlos Eduardo Andrade Gomes Barreto. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Denis José Schiozer.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências.

1. Engenharia de petróleo. 2. Reservatórios (Simulação). 3. Otimização. 4. Poços de petróleo. 5. Válvulas. I. Schiozer, Denis José, 1963-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Optimal placement design of inflow control valve using a dynamic optimization process

Palavras-chave em inglês:

Petroleum engineering

Reservoir simulation

Optimization

Petroleum wells

Control valves

Área de concentração: Reservatórios e Gestão

Titulação: Doutor em Ciências e Engenharia de Petróleo

Banca examinadora:

Denis José Schiozer [Orientador]

Rosângela Barros Zanoni Lopes Moreno

Rubens Maciel Filho

Ramiro Brito Willmersdorf

Régis Kruehl Romeu

Data de defesa: 29-01-2014

Programa de Pós-Graduação: Ciências e Engenharia de Petróleo



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

TESE DE DOUTORADO

METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO PARA AVALIAÇÃO
DO USO DE VÁLVULAS DE CONTROLE EM POÇOS NA
SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA DE PRODUÇÃO

Autor: Carlos Eduardo Andrade Gomes Barreto

Orientador: Prof. Dr. Denis José Schiozer

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta tese:

Prof. Dr. Denis José Schiozer, Presidente
DE/FEM/UNICAMP

Prof. Dra. Rosângela Barros Zanon Lopes Moreno
DE/FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Rubens Maciel Filho
DDPP/FEQ/UNICAMP

Prof. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf
DEMC/UFPE

Dr. Régis Kruel Romeu
PETROBRAS

Campinas, 29 de janeiro de 2014

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese aos meus sobrinhos Maria Carolina Andrade Gomes Barreto, Adna Valéria Andrade Barreto Santos e Paulo Henrique Menezes Andrade Barreto, que são uma grande alegria na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Denis José Schiozer por todos esses anos de convívio em que aprendi muito sobre pesquisa e profissionalismo. Também agradeço pela confiança depositada em mim no desenvolvimento deste trabalho que foi essencial para o meu desenvolvimento profissional e satisfação pessoal.

Agradeço a minha esposa e colega de trabalho Ana Teresa Ferreira da Silva Gaspar por todos os conselhos, correções e discussões sobre os conceitos e qualidade deste trabalho, que muito acrescentaram ao desenvolvimento desta pesquisa e ao texto final da tese.

Agradeço em especial aos meus amigos Fernando Perin Munerato e Márcio Augusto Sampaio Pinto, que muito contribuíram para a formação e amadurecimento do meu conhecimento em engenharia de reservatórios, matemática e programação.

Meus sinceros agradecimentos a todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Petróleo e do UNISIM que sempre foram solícitos a todos os meus inúmeros pedidos e demonstraram simpatia e afeição durante esses anos.

Agradeço a toda amizade que encontrei aqui em Campinas dos muitos amigos que, parcialmente ou totalmente, estiveram presentes durante o período de doutorado e que, com certeza, me ajudaram a prosseguir no meu objetivo. Em especial gostaria de citar os seguintes nomes: Marcus André Siqueira Campos, Guilherme Avansi, Philipe Laboissiere, Eduin Munoz, Rafael Galeno, David Vasconcelos, Rui Cabral, Paulo Valdívia, José Nayro Moura, Daniel Carvalho, Humberto Bovolenta, Carol Badin, João Paulo Quinteiro, Odair José, Diogo Miranda, André Machado, Pedro Nogueira.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de bolsa de estudos pelo processo nº 2006/05330-8.

Agradeço a Baker Hughes Incorporated pelo financiamento do projeto Reservoir Recovery Optimization through Intelligent Wells, que patrocinou o desenvolvimento desta tese.

Agradeço a PETROBRAS que por meio das parcerias e auxílios realizadas com o UNISIM contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a Computer Modeling Group (CMG) e a Schlumberger pelas licenças dos softwares de simulação de reservatório.

“O homem é do tamanho do seu sonho.”

Fernando Pessoa

RESUMO

O posicionamento de válvulas de controle ao longo de poços de petróleo é baseado na viabilidade econômica de sua instalação para melhorar o desempenho da produção considerando o controle do escoamento do reservatório para o poço. Para tomar a decisão de instalar essas válvulas, frequentemente, a simulação de reservatórios é utilizada para representar a operação do sistema produtivo e auxiliar a estimativa dos benefícios econômicos e a avaliação de risco de fazer os investimentos requeridos. Entretanto, para casos específicos, o elevado número de variáveis envolvidos na solução deste problema e a relação entre os recursos computacionais disponíveis e o tempo necessário para avaliação fazem com que métodos tradicionais de otimização e seleção demandem muito esforço computacional sendo até inviáveis para algumas aplicações. Este trabalho propõe um método de otimização que utiliza dados técnicos e econômicos gerados na previsão do comportamento do reservatório para auxiliar na otimização e seleção de válvulas de controle em poços produtores. O principal objetivo do método é reduzir o número de variáveis do problema e o espaço de busca das variáveis delimitando regiões com maiores potenciais para serem analisadas. Selecionam-se quais regiões dos poços tem maior potencial de avaliação a partir do uso de indicadores de produção e econômicos. Com esta análise, a otimização é realizada por partes, privilegiando inicialmente as análises nas regiões com maior potencial e seguindo na direção das regiões com menor potencial até não ser mais encontrada a viabilidade de aplicação de válvulas. Cada região é otimizada de forma isolada. Isto evita a análise de regiões com menor potencial mesmo antes de avaliações em regiões potencialmente viáveis. Para avaliar a eficiência do método, os resultados encontrados são comparados com resultados gerados por um algoritmo evolucionário. A metodologia é aplicada em casos simples para avaliar o desempenho do método e melhor comparar com as repostas do algoritmo evolucionário e é aplicada em casos mais complexos para avaliar o desempenho do método em condições mais próximas às reais. Os resultados para o caso simples mostraram que o método proposto atingiu soluções similares aos encontrados pelo algoritmo evolucionário, mas com um número de simulações reduzido. Já para o caso mais complexo, os resultados apresentados pelo método proposto foram superiores e o algoritmo evolucionário apresentou dificuldade em solucionar o problema com o número máximo de simulações permitidas. O uso de dados técnicos e econômicos auxiliou de forma relevante na evolução do método de otimização, uma vez que reduziram o número de variáveis e o espaço de busca. Em

cada caso, os indicadores das alternativas testadas se mantiveram próximas aos da solução otimizada desde o início da simulação e não houve uma dispersão significativa, comparando com as soluções testadas pelo algoritmo evolucionário. Além disso, as avaliações mostram que o valor presente líquido de um projeto pode aumentar significativamente com a inclusão de válvulas de controle. Observa-se também uma influência significativa do cenário econômico no resultado das otimizações. Portanto, o método proposto pode ser utilizado em problemas reais com relevantes restrições computacionais e de tempo ao invés do uso de métodos tradicionais de otimização. Conclui-se que o método de otimização proposto atingiu os objetivos de ser eficiente na busca da solução ótima com um número reduzido de simulações de reservatórios. O uso de indicadores para guiar o método de otimização reduz o espaço de busca e evita a avaliação de alternativas com baixo potencial de aplicação. A otimização por partes é um instrumento que pode ser utilizado na otimização de válvulas de controle e auxilia na melhoria do desempenho do processo como um todo e, se bem utilizado, não interfere negativamente na obtenção de soluções próximas à ótima. Além disso, o uso de válvulas de controle se mostra viável em casos específicos, principalmente em casos em que existe uma restrição na vazão da plataforma. As válvulas de controle também são eficientes no aumento da produção total de óleo e na redução da vazão de água nos anos logo após a chegada de água, apesar de a produção total de água possa ser maior.

Palavras Chave: engenharia de petróleo, simulação de reservatórios, válvulas de controle, otimização dinâmica, poços inteligentes.

ABSTRACT

The selection of number and position of inflow control valves in petroleum wells is complex and involves a high number of analyses to determine their viability of installation. Reservoir simulation can be used to represent valve operation and forecast production to evaluate the benefits in long terms. However, in specific cases, the high number of variables involved in this type of problem associated with the usual time-consuming of a single reservoir simulation made traditional optimization methods inefficient to solve the problem within an adequate time frame. This work proposes a dynamic optimization process that uses economic and technical indicators to speed up the process. The main idea is to improve the exploration efficiency of the search space by selecting more potential well regions to start the process and to use an optimization workflow that splits the whole optimization in some sub-optimization processes to evaluate each region at time. To assess the effectiveness of the proposed method, its results are checked by comparing them with those of an evolutionary algorithm using a simple example. The methodology is also applied in a more complex example with different geological scenarios. The results show that the proposed method achieves good results when compared with the evolutionary algorithm results. The design optimization in the complex example shows that the dynamic process is able to significantly increase the Net Present Value of the field with an acceptable number of simulation runs. It is also shown that the use of economic and technical indicators can be applied to reduce the number of variables of the problem, to define suitable constraints for each variable and to help the initial guess of seeds for the optimization method. It is concluded that the proposed methodology can be efficiently used to optimize inflow control valve design in cases in which computational resources and available time are limited. The use of indicators to explore better the search space is a viable way to selected more potential alternatives to be analyzed. The division of the whole optimization process in smaller pieces is an alternative to reduce the number of variables and to make faster evaluation, without losing precision. In addition, the application of valves can improve total oil production, to retard water breakthrough and to reduce the water flow rate in the beginning of the water production, even with an increase in the total water production.

Key Word: petroleum engineering; reservoir simulation; inflow control valve; dynamic optimization; intelligent wells.

Índice

1.	INTRODUÇÃO	1
	1.1 Justificativa/Motivação	4
	1.2 Objetivos	4
	1.3 Premissas.....	5
2.	REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
	2.1 Poços Inteligentes.....	7
	2.1.1 Uso dos poços inteligentes.....	7
	2.1.2 Estrutura dos poços inteligentes	9
	2.1.3 Tipos de válvulas de controle	11
	2.2 Criação e avaliação de alternativas na engenharia de reservatórios	12
	2.2.1 Criação de alternativas.....	12
	2.2.2 Teoria dos sistemas de engenharia de reservatórios	15
	2.3 Modelagem estrutural de poços inteligentes	21
	2.4 Sistemas de controle de poços inteligentes	23
	2.5 Estratégia de produção de petróleo	25
	2.5.1 Complexidade das estratégias de produção de petróleo	26
	2.5.2 Avaliação econômica de estratégias de produção.....	30
	2.6 Métodos aplicados à otimização de poços inteligentes.....	31

2.6.1	Desafios dos problemas práticos de otimização dentro da engenharia de reservatórios	32
2.6.2	Descrição matemática do problema de otimização de número e posição de válvulas de controle.....	32
2.6.3	Visão geral sobre as abordagens utilizadas na otimização do número e posição de válvulas de controle.....	35
2.6.4	Principais métodos de otimização utilizados na literatura.....	36
2.6.5	Solução de problemas de larga escala em engenharia	37
2.6.6	Algoritmo evolucionário aplicado ao controle de válvulas	39
2.6.7	Método da ascendente da maior inclinação	41
2.7	Uso de métodos determinísticos de otimização na avaliação de sistemas probabilísticos.....	42
2.7.1	Avaliação probabilística por meio de amostragem.....	42
2.7.2	Avaliação de confiabilidade por meio de árvores de falha.....	43
2.7.3	Exemplificação do uso de métodos de determinísticos na avaliação probabilística	44
2.7.4	Justificativa para o desenvolvimento de métodos de otimização determinística	46
2.8	Representação do acionamento de válvulas de controle nos simuladores IMEX e ECLIPSE	46
3.	METODOLOGIA	49
3.1	Metodologia de trabalho	49
3.2	Metodologia de otimização dinâmica por partes (MOD-P).....	50
3.2.1	Descrição geral	50
3.2.2	Procedimento P1 - Avaliação de indicadores em um tempo específico t^k	54

3.2.3	Procedimento P2 – ordenamento das regiões com potencial e definição das variáveis de projeto usadas no ciclo.....	57
3.2.4	Procedimento P3 – otimização do controle da região selecionada pelo uso de válvulas inteligentes.....	58
3.3	Desenvolvimento das rotinas computacionais.....	60
3.3.1	Rotinas de controle.....	61
3.3.2	Rotinas específicas.....	62
3.4	Validação.....	62
3.4.1	Otimização utilizando algoritmo evolucionário (AE).....	64
3.5	Verificação do método de otimização proposto em casos mais complexos.....	65
4.	APLICAÇÕES.....	67
4.1	E-1 – Exemplo simples para validação do método de otimização.....	68
4.1.1	M-1 – Modelo de reservatório utilizado para execução do exemplo E-1.....	69
4.1.2	ME-1 – Modelo econômico utilizado para a execução do exemplo E-1.....	72
4.1.3	MS-1 – Modelo de caracterização do sistema para o exemplo E-1.....	72
4.1.4	Descrição do problema de otimização.....	75
4.1.5	Árvore de derivação de casos criados para avaliação do número e da posição de válvulas	78
4.2	E-2 – Exemplo de validação e verificação do método de otimização em casos complexos.....	80
4.2.1	M-2 – Modelo de reservatórios e estratégia inicial para verificação do método de otimização MOD-P.....	80
4.2.2	ME-2 – Modelo econômico utilizado para a execução do exemplo E-2.....	87
4.2.1	MS-2 – Modelo de caracterização do sistema para o exemplo E-2.....	88
4.2.2	Descrição do problema de otimização para o exemplo E-2.....	90

4.2.3	Árvore de derivação de casos criados para avaliação do número e posição de válvulas no exemplo E-2	96
5.	RESULTADOS.....	99
5.1	Resultados do exemplo E-1.....	99
5.1.1	Comparação geral entre MOD-P e AE	99
5.1.2	Avaliação do desempenho dos métodos na busca da solução ótima	102
5.1.3	Impactos da otimização do número e da posição das válvulas de controle no desempenho do reservatório.....	113
5.1.4	Avaliação dos indicadores ao longo da otimização do problema MOD-P1 ..	129
5.1.5	Conclusão da análise dos resultados do exemplo E-1	150
5.2	Resultados do exemplo E-2.....	151
5.2.1	Comparação geral entre MOD-P e AE	152
5.2.2	Avaliação do desempenho dos métodos na busca da solução ótima	156
5.2.3	Impactos da otimização do número e da posição das válvulas de controle no desempenho do reservatório.....	166
5.2.4	Avaliação dos indicadores ao longo da otimização do problema MOD-P2 ..	174
5.2.5	Otimização do exemplo E-2 para diferentes cenários econômicos	193
6.	Considerações finais, conclusões e recomendações	207

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Publicações sobre poços inteligentes armazenadas na base de dados OnePetro.	8
Figura 2-2: Esquema simplificado de um poço inteligente (Adaptado de Pinto, 2013).....	10
Figura 2-3: Criação de alternativas plausíveis (Adaptado de Rudd e Watson, 1968)	13
Figura 2-4: Principais atividades para a construção de um modelo para aplicação (Adaptada de Edgar et al., 2001).	18
Figura 2-5: Esquema de atividades da engenharia de sistemas (Costa, 1972).	20
Figura 2-6: Diferentes aspectos que podem ser utilizados para avaliar uma alternativa.	21
Figura 2-7: Esquema representativo de um poço completado com válvulas de controle (ICV).	22
Figura 2-8: Modelo de controle adotado para operação das válvulas de controle.....	23
Figura 2-9: Esquema simplificado da cronologia relativa aos esforços que se requer da engenharia de reservatórios para a seleção de estratégias de produção.	28
Figura 2-10: Esquema de otimização de subsistemas para alcançar uma resposta otimizada.	39
Figura 2-11: Esquema da aplicação de algoritmo evolucionário.....	40
Figura 2-12: Exemplo de árvore de falhas para avaliar um determinado equipamento.	44
Figura 2-13: Esquema para avaliação de incertezas, flexibilidade e confiabilidade por meio de métodos determinísticos.	45
Figura 2-14: Ilustração para a representação de regiões do campo controladas por válvulas de controle (Pinto, 2013).....	47
Figura 3-1: Esquema de divisão do problema de otimizar número e posição de válvulas em problemas menores.....	51

Figura 3-2: Algoritmo de otimização por partes do número e posicionamento de válvulas de controle.....	52
Figura 3-3: Esquema geral do uso de rotinas computacionais para desenvolvimento do MOD-P.....	61
Figura 3-4: Exemplos de curva do VPL em função do tempo de fechamento de válvula de controle.....	65
Figura 4-1: Malha de simulação e localização dos poços do modelo M-1.....	69
Figura 4-2: Permeabilidade horizontal do M-1.....	69
Figura 4-3: Curva de permeabilidade relativa para óleo e água no M-1.	71
Figura 4-4: Curvas de viscosidade e fator volume-formação para o óleo no M-1.	71
Figura 4-5: Vazão média diária de óleo e água para o Modelo 1c.	71
Figura 4-6: Corte de água em diferentes completações do poço produtor para o Modelo 1c.	71
Figura 4-7: Descrição geométrica do modelo de sistema MS-1.....	74
Figura 4-8: Sistema utilizado para alteração do controle com base em informações de longo prazo geradas por simulação de reservatórios.....	74
Figura 4-9: Árvore de derivação com todos os casos utilizados no exemplo E-1.....	79
Figura 4-10: Distribuição litológica do M-2.....	81
Figura 4-11: Permeabilidade no plano horizontal do M-2.....	81
Figura 4-12: Distribuição da porosidade do M-2.....	81
Figura 4-13: Distribuição da permeabilidade em uma seção do M-2.....	81
Figura 4-14: Vista superior da distribuição das fraturas de alta permeabilidade e selantes.	82
Figura 4-15: Perspectiva da distribuição das fraturas de alta permeabilidade e selantes.	82
Figura 4-16: Falhas selantes (azul) e fraturas permeáveis dos modelos M-2a, esquerda, e M-2b, direita.....	82

Figura 4-17: Curvas de permeabilidade relativa do óleo e água para a matriz.....	84
Figura 4-18: Curvas de permeabilidade relativa do óleo e água para a fratura.	84
Figura 4-19: Curva de razão de solubilidade do gás no óleo.....	84
Figura 4-20: Curvas do fator volume-formação e de viscosidade do óleo.	84
Figura 4-21: Estratégia de produção utilizada no E-2 e otimizada para número e posição dos poços no trabalho de Botechia (2012).....	85
Figura 4-22: Produção e injeção acumulada para a estratégia inicial no modelo M-2a.	85
Figura 4-23: Produção e injeção acumulada para a estratégia inicial no modelo M-2b.	85
Figura 4-24: Produção e injeção acumulada para a estratégia inicial no modelo M-2c.	86
Figura 4-25: Produção e injeção acumulada para a estratégia inicial no modelo M-2d.	86
Figura 4-26: Vazão de líquidos diária média anual para os modelos de reservatório do exemplo E-2.	87
Figura 4-27: Corte de água para os poços produtores no modelo M-2a.....	87
Figura 4-28: Descrição geométrica do modelo de sistema MS-2 para um poço <i>j</i>	90
Figura 4-29: Seção vertical do modelo de reservatório MS-2 explicitando as diferentes camadas isoladas do reservatório.	94
Figura 4-30: Árvore de derivação com todos os casos utilizados no exemplo E-2.	98
Figura 5-1: Evolução dos métodos MOD-P (eixo superior) e AE (eixo inferior) na busca da solução ótima para o caso M-1a.	105
Figura 5-2: Evolução dos métodos MOD-P (eixo superior) e AE (eixo inferior) na busca da solução ótima para o caso M-1b.....	106
Figura 5-3: Evolução dos métodos MOD-P (eixo superior) e AE (eixo inferior) na busca da solução ótima para o caso M-1c.	106
Figura 5-4: Evolução dos métodos MOD-P (eixo superior) e AE (eixo inferior) na busca da solução ótima para o caso M-1d.....	107

Figura 5-5: Evolução dos métodos MOD-P (eixo superior) e AE (eixo inferior) na busca da solução ótima para o caso M-1e.....	107
Figura 5-6: Indicadores de produção de longo prazo dos problemas otimizados associados às permeabilidades do canal de cada caso.....	115
Figura 5-7: Relação entre volume de óleo recuperado e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1a.	117
Figura 5-8: Relação entre volume de óleo recuperado e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1b.....	118
Figura 5-9: Relação entre volume de óleo recuperado e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1c.	119
Figura 5-10: Relação entre volume de óleo recuperado e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1d.....	120
Figura 5-11: Relação entre volume de óleo recuperado e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1e.....	121
Figura 5-12: Relação entre volume produzido de água e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1a.	123
Figura 5-13: Relação entre volume produzido de água e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1b.....	124
Figura 5-14: Relação entre volume produzido de água e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1c.	125
Figura 5-15: Relação entre volume produzido de água e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1d.....	126
Figura 5-16: Relação entre volume produzido de água e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1e.....	127
Figura 5-17: Evolução do indicador I_2 para poço ao longo do tempo simulado.	130
Figura 5-18: Evolução do indicador I_3 para poço ao longo do tempo simulado.	131

Figura 5-19: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para o poço P-01 nos casos M-1a e M-1e e delimitação das regiões de avaliação.	132
Figura 5-20: Evolução do indicador I_2 para regiões do poço no caso M-1a.....	133
Figura 5-21: Evolução do indicador I_2 para regiões do poço no caso M-1e.....	134
Figura 5-22: Evolução do indicador I_3 para regiões ao longo do tempo simulado para o caso M-1a.	135
Figura 5-23: Evolução do indicador I_3 para poço ao longo do tempo simulado para o caso M-1e.	136
Figura 5-24: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para as regiões $RMP^{1,1}$ e $RMP^{7,1}$ no caso M-1a e delimitação das regiões de avaliação.	137
Figura 5-25: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para as regiões $RMP^{1,1}$ e $RMP^{7,1}$ no caso M-1e e delimitação das regiões de avaliação.	138
Figura 5-26: Evolução do indicador I_4 para o poço no exemplo E-1.	139
Figura 5-27: Evolução do indicador I_6 para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ do caso M-1a.	140
Figura 5-28: Evolução do indicador I_6 para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ do caso M-1e.	141
Figura 5-29: Evolução do indicador I_2 para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ do caso M-1a.	142
Figura 5-30 Evolução do indicador I_2 para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ do caso M-1e.	142
Figura 5-31: Evolução do indicador I_5 com base na região $RMP^{7,1}$ para cálculo da diferença do corte de água para as regiões $RMP^{6,1}$ e $RMP^{8,1}$ do caso M-1a.	143
Figura 5-32: Evolução do indicador I_5 com base na região $RMP^{7,1}$ para cálculo da diferença do corte de água para as regiões $RMP^{6,1}$ e $RMP^{8,1}$ do caso M-1e.	144

Figura 5-33: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para o poço P-01 e para o caso M-1c, após a inclusão de uma válvula de controle na região $RMP^{7,1}$	145
Figura 5-34: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para a região $RMP^{8,1}$ e para o caso M-1c, após a inclusão de uma válvula de controle na região $RMP^{7,1}$	147
Figura 5-35: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para a região $RMP^{6,1}$ e para o caso M-1c, após a inclusão de uma válvula de controle na região $RMP^{7,1}$	147
Figura 5-36: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para a região $RMP^{1,1}$ e para o caso M-1c, após a inclusão de uma válvula de controle na região $RMP^{7,1}$	148
Figura 5-37: Evolução do indicador I_4 para o poço P-01 e para o caso M-1c, após a inclusão de uma válvula de controle na região $RMP^{7,1}$	149
Figura 5-38: Evolução da função-objetivo do exemplo E-2 com modelo econômica ME-2a para o método de otimização MOD-P, considerando o VPL relativo à mudança na estratégia inicial.....	157
Figura 5-39: Evolução da função-objetivo do caso M-2a com modelo econômica ME-2a para o método de otimização AE, considerando o VPL relativo à mudança na estratégia inicial.	158
Figura 5-40: Evolução da função-objetivo do caso M-2b com modelo econômica ME-2a para o método de otimização AE, considerando o VPL relativo à mudança na estratégia inicial.	159
Figura 5-41: Evolução da função-objetivo do caso M-2c com modelo econômica ME-2a para o método de otimização AE, considerando o VPL relativo à mudança na estratégia inicial.	159
Figura 5-42: Evolução da função-objetivo do caso M-2d com modelo econômica ME-2a para o método de otimização AE, considerando o VPL relativo à mudança na estratégia inicial.	160
Figura 5-43: Previsão da produção do campo para o caso M-2a e modelo econômico ME-2a.	168

Figura 5-44: Previsão da produção do campo para o caso M-2b e modelo econômico ME-2a.....	168
Figura 5-45: Diferença entre o fluxo de caixa líquido anual descontado da estratégia otimizada e da estratégia inicial para o caso M-2a, utilizando o modelo econômico M-2a.	171
Figura 5-46: Diferença entre as médias da vazão diária de óleo obtidas no final de cada ano de produção para o caso M-2a.....	173
Figura 5-47: Diferença entre as médias da vazão diária de água obtidas no final de cada ano de produção para o caso M-2a.....	173
Figura 5-48: Indicadores I_2 e I_3 da estratégia inicial para o campo no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	175
Figura 5-49: Indicador I_2 da estratégia inicial para os poços produtores no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	176
Figura 5-50: Indicador I_3 da estratégia inicial para os poços produtores no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	177
Figura 5-51: Evolução do indicador I_2 e I_3 para os poços Prod-1 e Prod-8 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	178
Figura 5-52: Evolução do indicador I_2 para regiões do poço Prod-1 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	179
Figura 5-53: Evolução do indicador I_3 para regiões do poço Prod-1 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	179
Figura 5-54: Evolução do indicador I_2 e I_3 para as regiões $RMP^{9,1}$ e $RMP^{15,1}$ do Prod-1 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	180
Figura 5-55: Evolução do indicador I_4 para os poços produtores da estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.....	181
Figura 5-56: Evolução do indicador I_2 para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$, $RMP^{8,1}$ e $RMP^{9,1}$ da estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	182

Figura 5-57: Evolução do indicador I_6 para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$, $RMP^{8,1}$ e $RMP^{9,1}$ do Prod-1 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	182
Figura 5-58: Evolução do indicador I_7 para as regiões $RMP^{8,1}$ e $RMP^{9,1}$ do Prod-1 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	183
Figura 5-59: Diferença entre o corte de água das regiões $RMP^{8,1}$ e $RMP^{9,1}$ do Prod-1 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	184
Figura 5-60: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para o campo no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	186
Figura 5-61: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para o poço Prod-1 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	187
Figura 5-62: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para o poço Prod-8 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	187
Figura 5-63: Evolução do indicador I_2 para as regiões $RMP^{9,1}$ e $RMP^{15,1}$ do poço Prod-1 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	188
Figura 5-64: Evolução do indicador I_3 para as regiões $RMP^{9,1}$ e $RMP^{15,1}$ do poço Prod-1 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	189
Figura 5-65: Evolução do indicador I_4 para o poço Prod-1, Prod-2 e Prod-8 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	190
Figura 5-66: Evolução do indicador I_2 para regiões do poço Prod-1 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	191
Figura 5-67: Evolução do indicador I_6 para regiões do poço Prod-1 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	191
Figura 5-68: Diferença entre o indicador I_7 da estratégia otimizada e a estratégia inicial para regiões do poço Prod-1 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.	192
Figura 5-69: Relação entre o VPL das válvulas de controle e o preço do óleo.	197
Figura 5-70: Relação entre o VPL das válvulas de controle e o custo da água produzida.	197

Figura 5-71: Relação entre o aumento porcentual no VPL da estratégia inicial e o preço do óleo.....	198
Figura 5-72: Relação entre o aumento porcentual no VPL da estratégia inicial e o custo da água produzida.	198
Figura 5-73: Relação entre o aumento na produção de óleo causado pela aplicação de válvulas de controle e o preço do óleo.	199
Figura 5-74: Relação entre o aumento na produção de óleo causado pela aplicação de válvulas de controle e o custo da água.	199
Figura 5-75: Aumento porcentual na produção total de óleo em relação à estratégia inicial e o preço do óleo.	200
Figura 5-76: Aumento porcentual na produção total de óleo em relação à estratégia inicial e o custo da água.	200
Figura 5-77: Relação entre a redução na produção de água causada pela aplicação de válvulas de controle e o preço do óleo.	201
Figura 5-78: Relação entre a redução na produção de água causada pela aplicação de válvulas de controle e o custo da água.	202
Figura 5-79: Relação entre a redução porcentual na produção total de água em relação à estratégia inicial e o preço do óleo.	202
Figura 5-80: Relação entre a redução porcentual na produção total de água em relação à estratégia inicial e o custo da água.	203
Figura 5-81: Relação entre investimentos necessários para instalação de válvulas de controle e o preço do óleo.	204
Figura 5-82: Relação entre investimentos necessários para instalação de válvulas de controle e o custo da água.	204

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Lista de termos utilizados para a definição e validação de um modelo.	19
Tabela 2-2: Exemplo de aplicação dos comandos COMPLUMP e CECON para fechamento de válvulas no simulador ECLIPSE.	48
Tabela 2-3: Exemplo de fechamento de válvula por meio de alteração no comando PERF no simulador IMEX.	48
Tabela 3-1: Indicadores de desempenho eliminatórios, regras e critérios usados para avaliar o potencial de aplicação de válvulas de controle.	57
Tabela 3-2: Indicadores de desempenho classificatório e de projeto usados para avaliar o potencial de aplicação de válvulas de controle.	59
Tabela 3-3: Descrição geral das rotinas específicas utilizadas na programação computacional da metodologia proposta.	63
Tabela 4-1: Parâmetros utilizados no modelo econômico para cálculo do fluxo de caixa líquido do campo, poço e RMP.	73
Tabela 4-2: Critérios adotados para execução do método MOD-P no problema MOD-P1.	76
Tabela 4-3: Parâmetros prefixados para execução do método AE no exemplo E-1.	78
Tabela 4-4: Parâmetros do modelo de reservatório.	83
Tabela 4-5: Parâmetros utilizados no modelo econômico para cálculo do fluxo de caixa líquido do campo, poço e RMP.	88
Tabela 4-6: Parâmetros de entrada para o modelo econômico utilizado no exemplo E-2.	89
Tabela 4-7: Critérios adotados para execução do método MOD-P no problema MOD-P2.	92
Tabela 4-8: Parâmetros prefixados para execução do método AE no exemplo E-2 (Parte 1).	95
Tabela 4-9: Parâmetros prefixados para execução do método AE no exemplo E-2 (Parte 2).	96

Tabela 5-1: Informações gerais sobre a otimização do exemplo E-1.	100
Tabela 5-2: Variáveis utilizadas e função-objetivo obtida no processo de otimização do caso M-1a.	108
Tabela 5-3: Variáveis utilizadas e função-objetivo obtida no processo de otimização do caso M-1b.	109
Tabela 5-4: Variáveis utilizadas e função-objetivo obtida no processo de otimização do caso M-1c.	110
Tabela 5-5: Variáveis utilizadas e função-objetivo obtida no processo de otimização do caso M-1d.	111
Tabela 5-6: Variáveis utilizadas e função-objetivo obtida no processo de otimização do caso M-1e.	112
Tabela 5-7: Indicadores técnicos e econômicos das soluções otimizadas para o exemplo E-1.	114
Tabela 5-8: Indicador I_6 para as regiões $RMP^{1,1}$, $RMP^{6,1}$ e $RMP^{8,1}$ para a estratégia inicial e em processo de otimização do caso M-1c.	149
Tabela 5-9: Indicador I_2 para as regiões $RMP^{1,1}$, $RMP^{6,1}$ e $RMP^{8,1}$ para a estratégia inicial e em processo de otimização do caso M-1c.	150
Tabela 5-10: Informações gerais sobre a otimização do exemplo E-2 para o modelo econômico ME-2a.	152
Tabela 5-11: Variáveis otimizadas pelos métodos MOD-P e AE para o caso M-2b e modelo econômico ME-2a.	155
Tabela 5-12: Simulações executadas pelo MOD-P para avaliar a potencialidade de regiões na otimização do M-2a para o ME-2a (parte 1).	162
Tabela 5-13: Simulações executadas pelo MOD-P para avaliar a potencialidade de regiões na otimização do M-2a para o ME-2a (parte 2).	163
Tabela 5-14: Simulações executadas pelo MOD-P para avaliar a potencialidade de regiões na otimização do M-2a para o ME-2a (parte 3).	164

Tabela 5-15: Indicadores técnicos e econômicos das soluções otimizadas para os casos M-2a e M-2b.	167
Tabela 5-16: Indicadores econômicos dos produtores para o caso M-2a, modelo econômico ME-2a.	169
Tabela 5-17: Dados gerais da otimização dos casos otimizados no exemplo E-2.	195
Tabela 5-18: Número de simulações utilizadas para otimização dos casos do exemplo E-2.	196

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

α	Coeficiente de distância entre válvulas
λ	Razão de mobilidade, adimensional
Ω	Conjunto de parâmetros de um sistema fiscal
AG	Algoritmo evolucionário
B_o	Fator volume-formação, adimensional
C_{ICV}	Coeficiente de descarga de uma válvula, adimensional
C_u	Custo de produção de um fluido indesejado, unidade monetária.L ⁻³
CI	Ciclo interno
CE	Ciclo externo
FCL	Fluxo de caixa líquido
$d^{i,j}$	Distância entre dois equipamentos de isolamento (<i>packers</i>) que isolam a i-ésima válvula de controle do j-ésimo poço
d_{\max}	Máxima distância econômica entre dois equipamentos de isolamento, L ⁻¹
d_{\min}	Mínima distância econômica entre dois equipamentos de isolamento, L ⁻¹
ES	Estágio adotado na execução do método MOD-P
F	Vazão volumétrica, L ³ .T ⁻¹
$f(n_v, \hat{u}, \hat{v})$	Função-objetivo para otimização de número e posição de válvulas
fm	Índice de identificação de um fluido em uma mistura
g_j	j-ésima restrição da m-ésima inequação de restrição.
I	Matriz de indicadores de um sistema geométrico discreto
i	Índice de identificação de válvulas de controle
ICV	Válvula de controle de fluxo (<i>Inflow control valve</i>)
j	Índice de identificação de poço
k	Índice de identificação de tempo
t_n	Número total de tempos discretos
m	Número total de restrições de variáveis
n_w	Número total de poços
n_v	Número total de válvulas
n_r^j	Número total de regiões consideradas no sistema geométrico discreto de representação de um poço
n_r^i	Número total de regiões que compõe uma região controlada pela válvula i
n_{ind}	Número total de indicadores de desempenho
VPL	Valor presente líquido
P	Procedimento
PTAC	Produção total de água do campo

PTOC	Produção total de água do campo
ΔP	Diferença de pressão, $M^1.L^{-2}.T^{-2}$
P_{BH}	Pressão de fundo do poço, $M^1.L^{-2}.T^{-2}$
P_r	Pressão do reservatório, $M^1.L^{-2}.T^{-2}$
PI	Índice de produtividade
p	Número total de fluidos considerados em um escoamento
ph	Índice de identificação de um fluido em uma mistura
R	Rotina
R_s	Razão de solubilidade
RMP	Região de monitoramento do poço
r	Índice de identificação de regiões de um poço
std	<i>standard</i> , refere-se as condições de fluidos na pressão de superfície
$s_1^{i,j}$	Posição do equipamento de isolamento superior da i-ésima válvula de controle no j-ésimo poço, L^1
$s_2^{i,j}$	Posição do equipamento de isolamento inferior da i-ésima válvula de controle no j-ésimo poço, L^1
s	Posição em uma trajetória, L^1
sg	Densidade, adimensional
t	Tempos, T^1
t_{sd}	Tempo de fechamento de uma válvula de controle, T^1
t_{aband}	Tempo de abandono da produção, T^1
t_{ini}	Tempo do início da produção, T^1
\hat{u}^l	Vetor de restrição inferior das variáveis de projeto
\hat{u}^u	Vetor de restrição superior das variáveis de projeto
\hat{u}	Vetor de variáveis de projeto
USD	Dólar
\hat{v}	Vetor de projeto para localização das válvulas
\hat{w}	Vetor de projeto para controle de válvulas
WT	Função da trajetória de um poço
wl	Comprimento de um poço, L^1
WCT	Corte de água
x	Fração da área total de abertura de uma válvula, adimensional

1. INTRODUÇÃO

Na última década, um importante avanço nas tecnologias para aumento do desempenho da produção de petróleo foi o desenvolvimento de ferramentas que permitem a instalação de válvulas de controle em poços produtores e injetores. As válvulas são usadas com o intuito de controlar a vazão de poços por zona ou controlar a vazão de vários poços interconectados ou ainda a vazão de poços multi-segmentados.

Além das válvulas, têm-se desenvolvido importantes tecnologias que permitem o monitoramento da vazão multifásica e de outros parâmetros da produção que auxiliam no controle dos poços e das válvulas. Poços que contêm esse tipo de tecnologia são comumente chamados na literatura de poços inteligentes (“*intelligent wells*” ou “*smart wells*”, em inglês) por serem considerados de tecnologia avançada e permitirem um controle mais racional do reservatório.

A indústria do petróleo e a academia têm dado uma significativa atenção ao tema “uso de válvulas de controle em poços”. Cada vez mais, tem-se noticiado a instalação de válvulas em campo de petróleo, publicado artigos científicos em periódicos especializados e patrocinado conferências e congressos em torno desse assunto.

No âmbito industrial, para melhorar a eficiência da produção e reduzir os riscos, o desenvolvimento de metodologias de controle do campo é peça fundamental e essas válvulas fazem parte de uma nova estrutura para operação de poços que avançam para os chamados campos digitais^[1]. À engenharia de reservatórios, cabe desenvolver essas metodologias e avaliar o uso dessas tecnologias também nas fases iniciais de planejamento da produção do campo.

Entre os problemas importantes da área de engenharia de reservatórios estão a demonstração das vantagens e desvantagens do uso de válvulas de controle e da indicação de meios adequados para operá-las em campo. Mostrar a viabilidade de implantação de válvulas em poços in-

^[1]De forma geral, campos digitais é o nome dado aos campos em que o controle da produção é realizado a partir de um complexo sistema de informações digitais, interpretação automatizada e controle de equipamentos através de comandos instalados na superfície, sem necessidade de intervenções em poços para a tomada de informações e para acionamento dos comandos.

teligentes é uma tarefa que pode demandar muito esforço técnico devido à complexidade do processo de avaliação dos potenciais benefícios da ferramenta.

A modelagem de um sistema de reservatórios e do fluxo de caixa líquido para casos com válvulas é complexa. Em geral, sua avaliação faz uso de simuladores de reservatórios. Uma correta modelagem inclui a possibilidade de uso das informações geradas na operação e a flexibilidade proporcionada pelos sistemas de acionamento das válvulas. A alteração de investimentos e custos operacionais do campo também deve ser considerada.

Além disso, devido à capacidade de variações na produção dos poços com consequente impacto no fluxo de caixa de um campo, o uso de válvulas de controle pode alterar, significativamente, as características de projeto dos poços e do próprio campo. Sendo assim, é importante avaliar o uso de poços inteligentes na fase inicial de planejamento do campo, antes mesmo da escolha de equipamentos e instalações de superfície e número de poços.

Entretanto, definir uma estratégia para iniciar a produção de um campo de petróleo é uma tarefa que envolve a consideração de investimentos elevados em instalações, um número grande de opções de equipamentos, métodos de exploração e um elevado nível de incertezas inerentes aos empreendimentos petrolíferos.

Esta grande quantidade de variáveis de decisão e atributos incertos torna a otimização e seleção de estratégia, uma tarefa de elevado grau de complexidade. Além disso, o esforço computacional para casos reais pode ser elevado. Assim, para incluir mais uma variável de decisão no processo de otimização global da estratégia de produção de um campo, a avaliação do uso de poços inteligentes deve ser feita com parcimônia e técnicas que não demandem tempo excessivo. Isso gera um desafio adicional para a engenharia de reservatórios.

A otimização da estratégia de produção com poços inteligentes deve encontrar a solução do problema da quantidade e localização das válvulas, além do tipo de válvula que se deseja aplicar. A solução deste problema tem sido o uso de métodos para a otimização do controle de válvulas em uma estratégia com um número de válvulas já definido e a posterior comparação entre diferentes estratégias com dado número e posicionamento de válvulas.

Em geral, este procedimento é realizado por meio do uso de métodos que demandam muito esforço computacional. Esta desvantagem fica mais relevante quando é necessário criar um con-

junto numeroso de estratégias de produção. Portanto, o atual estado da arte para a solução deste tipo de problema pode ser ineficiente para a aplicação em casos práticos.

Uma metodologia usualmente empregada em problemas de otimização de sistemas complexos consiste na otimização das variáveis por partes. Cada grupo de variáveis é otimizado separadamente. Este tipo de método é chamado de otimização assistida, nomenclatura empregada na indústria do petróleo, mas também chamada de macro-otimização, otimização multiníveis, otimização multi-disciplinar etc.^[1]

A aplicação destas metodologias torna possível diminuir o esforço necessário para se realizar uma única otimização com um grande número de variáveis, realizando um conjunto de otimizações menos complexas, com um número menor de variáveis. Entretanto, esta tarefa tem que ser executada de forma criteriosa para não gerar resultados tendenciosos e com soluções de baixa qualidade.

Uma forma para melhorar os resultados consiste no uso de informações do próprio sistema proposto. Assim, evita-se a inclusão de variáveis desnecessárias no processo e define-se uma hierarquia adequada para as etapas de otimização. Por exemplo, podem-se utilizar dados de simulação de reservatórios para avaliar regiões dos poços que não apresentam potencial para implantação de válvulas, como regiões que não produzem água ou gás. Com isso, diminui-se o espaço de busca para encontrar a solução ótima e as técnicas de otimização têm mais chances de obter o sucesso.

Conclui-se que o tema é relevante para a indústria de petróleo e apresenta importantes desafios para a engenharia de reservatórios. Os desafios incluem a modelagem apropriada do sistema e o uso de técnicas de otimização adequadas ao tempo disponível para avaliação. Além disso, os métodos de otimização apresentados na literatura são dispendiosos e podem ser ineficientes para análises de casos mais complexos. Algumas técnicas utilizadas em outras áreas podem auxiliar na melhoria dos métodos de otimização, como a otimização por partes e o uso de informação do sistema para melhor delimitar o problema.

Neste trabalho, as válvulas de controle são inseridas em um contexto de otimização global da estratégia de produção, o qual demanda métodos de otimização adequados à solução de pro-

^[1]Maiores detalhes sobre estes métodos serão apresentados no capítulo de revisão bibliográfica.

blemas que demandam muito esforço computacional. O trabalho pretende propor uma nova maneira para otimização do número e posição das válvulas a partir da avaliação de dados técnicos e econômicos obtidos por meio de simulação numérica, com o objetivo de maximizar o valor presente líquido do empreendimento. Pretende-se com isso propor uma metodologia de otimização adequada à prática na indústria e suficientemente confiável para a seleção do posicionamento e número de válvulas de controle em poços.

1.1 Justificativa/Motivação

A principal justificativa para o trabalho é a inexistência de uma metodologia eficiente para seleção de número e posição de válvulas de controle que levem em conta a otimização de um sistema completo de produção de petróleo e seja adequada aos requisitos impostos por algumas situações práticas da indústria e aos meios de computação disponíveis. Além disso, o entendimento sobre os efeitos do uso de válvulas inteligentes no comportamento de reservatórios ainda demanda estudos e análises, principalmente em casos com estratégias de produção mais complexas, com vários poços.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um processo dinâmico de otimização para análise de decisão sobre a implantação ou a consideração em projetos do uso de válvulas de controle em poços inteligentes. A metodologia proposta visa melhorar a avaliação de alternativas em um ambiente onde o tempo e os recursos computacionais são limitados, principalmente pelo uso de simulações de reservatório com alto tempo computacional. O processo é baseado na geração de informações técnicas e econômicas para identificar e selecionar alternativas com maior potencial.

O foco do trabalho é definir o projeto para a instalação das válvulas de controle na fase de planejamento do campo, no qual as decisões sobre as válvulas de controle são avaliadas em conjunto com a decisão sobre outros equipamentos de produção e existe uma demanda para avaliações mais rápidas. Também é objetivo deste trabalho a avaliação do efeito do controle das válvulas no comportamento do reservatório.

1.3 Premissas

São adotadas as seguintes premissas para o desenvolvimento de rotinas e criação dos sistemas utilizados no presente trabalho:

1. A instalação de válvulas pode ser feita ao longo de poços verticais e horizontais e não em outros pontos da estratégia de produção, como interseção em poços multilaterais.
2. São avaliados apenas campos com injeção de água e nos quais a produção de gás não é significativa para a economia da operação do campo.
3. A metodologia desenvolvida tem seu maior foco de aplicação para casos cujo esforço computacional para uma avaliação robusta e confiável restringe o número de simulações, tornando inviável a aplicação de métodos que demandam milhares de simulações.
4. Considera-se que os poços inteligentes geram informações precisas, sem ruídos. Portanto, os dados lidos representam exatamente o que está acontecendo no momento e não existem incertezas quanto à coleta de dados.
5. Considera-se que a regulação das válvulas é feita com 100% de confiança, sem ruídos e sem falhas operacionais. Portanto, não existem incertezas em relação às condições de fechamento em que as válvulas se encontram durante a produção.
6. Considera-se que os métodos determinísticos são utilizados como ferramenta auxiliar para avaliação de poços em condição de incertezas, justificando assim o desenvolvimento desta metodologia

A evolução da metodologia apresentada neste trabalho para incluir situações não contempladas por estas premissas pode ser realizada em trabalhos futuros por meio de adaptações na metodologia proposta e nas rotinas desenvolvidas.

2. REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, os conceitos básicos para entendimento do funcionamento e avaliação de poços inteligentes no contexto da engenharia de reservatórios são introduzidos. Além disso, são apresentadas técnicas de avaliação e otimização utilizadas neste trabalho. Com isso, espera-se sintetizar de forma teórica o conhecimento e as técnicas encontradas na literatura e proposta neste trabalho sobre modelagem de poços inteligentes no âmbito da engenharia de reservatórios, métodos de avaliação e otimização de estratégias de produção.

2.1 Poços Inteligentes

2.1.1 Uso dos poços inteligentes

A instalação de válvulas e sensores de monitoramento aplicados para controlar regiões específicas de poços de petróleo tem sido utilizada para controlar de forma mais eficiente as vazões de óleo, de fluidos indesejados e da injeção para recuperação secundária. O principal objetivo da instalação destes equipamentos é aumentar a rentabilidade do campo com o aumento da recuperação de óleo, a antecipação de receitas, a redução e retardamento da produção de água ou gás e a redução dos riscos de intervenções em poços. A principal ideia é possibilitar maior flexibilidade com informação adicional para gerenciar a produção de forma mais eficiente.

Poços completados com este tipo de tecnologia são chamados de “poços inteligentes” devido à evolução que esta tecnologia representa na indústria de petróleo e à capacidade de possibilitar o controle de forma mais racional da produção dos poços (Aitokhuehi and Durlofsky, 2005; Almeida et al., 2010; Alhuthali et al., 2010; Doublet et al., 2009; Yeten et al., 2004). Entretanto, convencionalmente, os projetos de poços de petróleo não contemplam o uso de válvulas e sensores ao longo do poço. A coluna de produção é ligada diretamente ao furo do poço, não sendo possível monitorar e controlar o escoamento sem intervenções no poço. Portanto, a diferença básica

entre um poço convencional e um poço inteligente é o sistema de controle e monitoramento mais sofisticados.

Na última década, os poços inteligentes têm sido amplamente utilizados na indústria e discutidos e avaliados na academia. A Figura 2-1 mostra a evolução da distribuição temporal das 1000 publicações mais relevantes armazenadas na base de dados “OnePetro” que possuem a palavra-chave “*intelligent well*” ou “*smart well*” no título e no resumo. O valor total de publicações com essas características de busca foi de 1241. A “OnePetro” é uma base de dados importante na indústria do petróleo e está ligada à Sociedade de Engenheiros de Petróleo (*Society Petroleum Engineers*). Apesar de se observar um pico no ano de 2010, correspondente a 150 publicações, a média de artigos publicados nos últimos cinco anos foi maior que 100 publicações por ano, evidenciando a relevância do assunto na indústria e na academia.

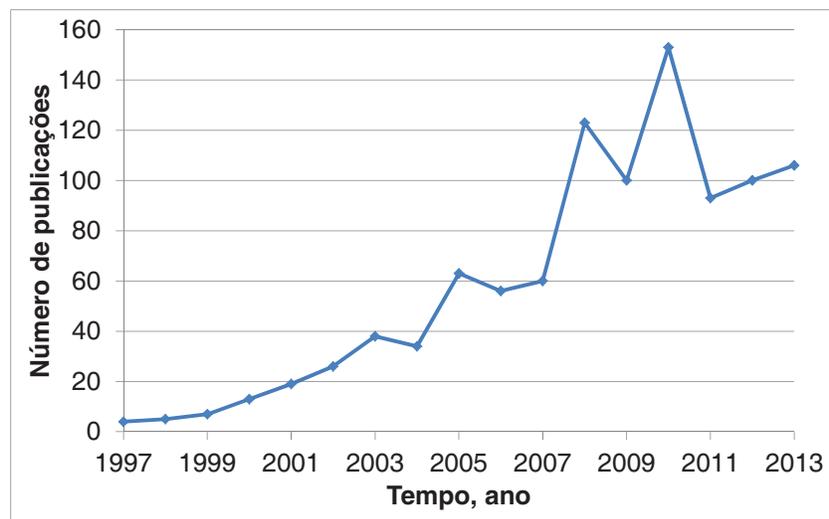


Figura 2-1: Publicações sobre poços inteligentes armazenadas na base de dados OnePetro.

Importantes empresas exploradoras de petróleo como Petrobras (Emerick e Portella, 2007; Silva et al., 2005), Chevron (Adeyemo et al., 2009), Saudi Aranco (Alhuthali et al., 2010), Shell (Chukwueke e Constantine, 2004), parceria Shell-BP (Chacon et al. 2007), Statoil (Kulkarni et al., 2007), entre outras, têm publicado artigos que mostram o interesse das companhias no uso das válvulas de controle em poços. Os trabalhos mostram aplicações reais de poços inteligentes em campos de petróleo. Além disso, uma ampla discussão sobre os chamados “Campos Digitais” (*Digital Fields*), que envolvem a aplicação de poços inteligentes entre outras tecnologias de mo-

nitoramento e controle, aponta que a aplicação dessas tecnologias é a vanguarda do gerenciamento de campos de petróleo (Al-Dhubaib, 2011). Portanto, a avaliação do uso de válvulas de controle em poços é um procedimento concreto nas companhias de petróleo e em estudos científicos na academia.

2.1.2 Estrutura dos poços inteligentes

Um poço inteligente é um poço de petróleo dotado de um sistema de controle com equipamentos físicos e digitais que permitem a operação independente de diferentes regiões de um poço, junção de poços multi-segmentados etc. A Figura 2-2 ilustra um esquema simplificado de um poço inteligente com uma determinada configuração de controle. O poço inteligente é composto por uma variedade de equipamentos, entretanto o que corresponde à sua “inteligência” são as decisões tomadas por equipes de profissionais que avaliam os dados monitorados do reservatório e tomam decisões “inteligentes”. Portanto, o poço inteligente é composto não só por equipamentos físicos, mas também pelo suporte técnico necessário para sua operação.

Seguindo a classificação sugerida para sistemas de controle por Ogunnaike e Ray (1994), os poços inteligentes podem ser divididos em:

- sensores: equipamentos que adquirem informação sobre o sistema monitorado, como temperatura, pressão e vazão. Os equipamentos de monitoramento podem ser instalados diretamente nas válvulas de controle ou em diferentes partes do poço;
- controladores: equipamentos ligados à tomada de decisão, que interpretam os dados dos sensores e respondem com uma condição operacional. Podem ser automáticos ou depender de uma resposta humana. Este sistema é o que é capaz de dotar o poço de “inteligência”. As ferramentas físicas que constituem esse sistema podem ser do tipo pneumático, eletrônico ou puramente digitais;
- transmissores: equipamento que transmitem as informações dos sensores para o controlador e destes para os elementos de controle final. Na Figura 2-2 os equipamentos transmissores são os cabos de transmissão;
- elementos de controle final: são os mecanismos que modificam diretamente as condições do sistema. Neste trabalho, os elementos de controle final são as válvulas de

controle. As válvulas de controle podem ser definidas como um equipamento operado por energia e destinado à regulação das vazões. Aqui são também chamadas de ICV, do inglês, *inflow control valve*;

- outros: outros equipamentos que podem ser utilizados para a interpretação de sinais, conversão de dados etc.

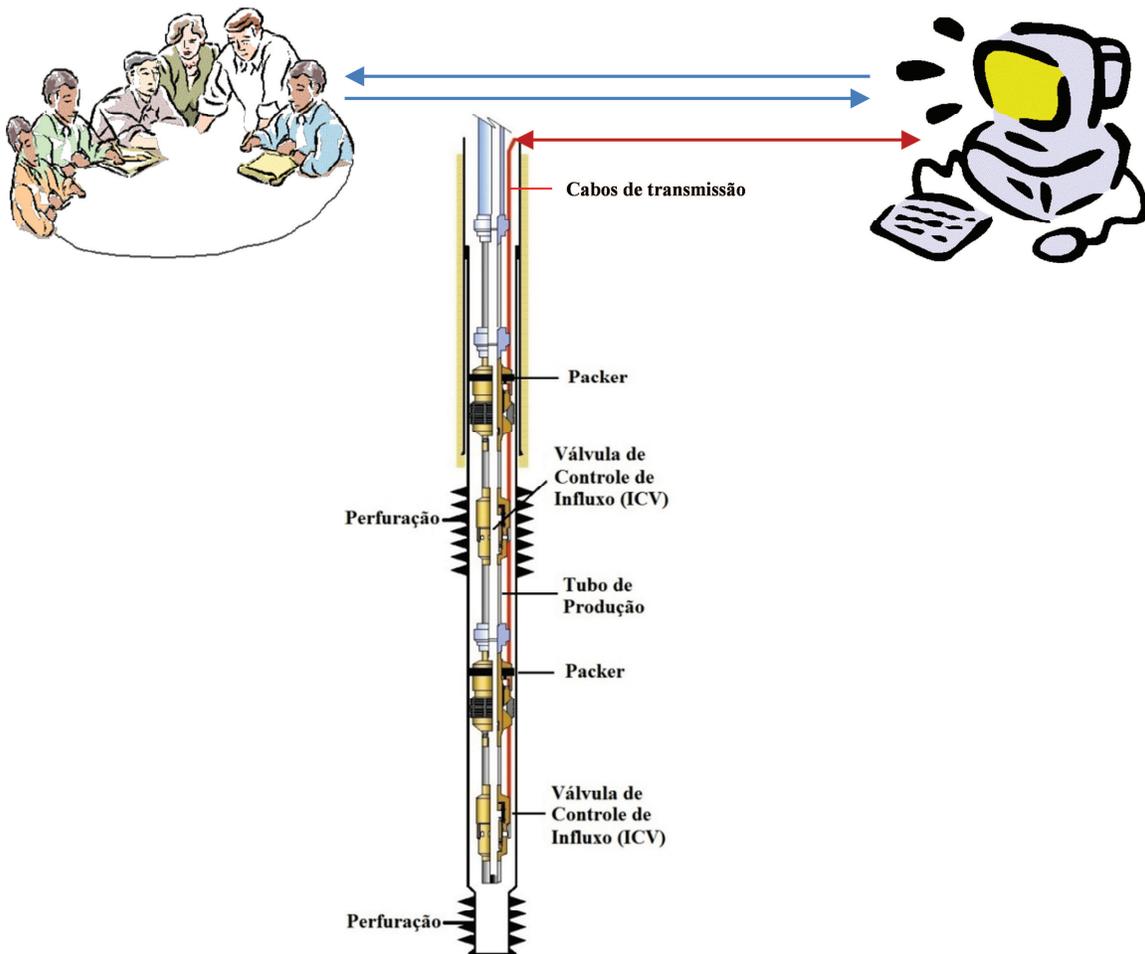


Figura 2-2: Esquema simplificado de um poço inteligente (Adaptado de Pinto, 2013).

Outro equipamento importante que compõe o poço inteligente são os elementos de isolamento de regiões do poço chamados de “*packers*”. Os *packers* têm a função de selar regiões do poço por meio de vedação da região anular entre a coluna de produção e o revestimento do poço,

possibilitando o controle do fluxo proveniente de diferentes regiões do reservatório. Com isso, a instalação dos *packers* possibilita um monitoramento e controle independente ao longo do poço.

Neste trabalho, o foco da avaliação é o número e a posição das válvulas de controle, e as correspondentes posições dos *packers* que isolam cada válvula de controle. Os sensores, controladores e equipamentos de transmissão são considerados como elementos fixos, que não fazem parte das decisões a serem tomadas nesta etapa de avaliação dos poços inteligentes.

2.1.3 Tipos de válvulas de controle

Existem diferentes tipos de válvulas de controle utilizadas na indústria de petróleo para regular a vazão do reservatório para o poço. As válvulas podem ser classificadas por diversas características como: quanto às alternativas de regulação que proporcionam, pelo tipo de mecanismo interno de fechamento, quanto ao modo de acionamento, quanto ao mecanismo de controle etc. Entretanto, em estudos de reservatórios, em geral, a principal característica avaliada se refere à quantidade de alternativas que as válvulas proporcionam. Portanto, cabe ao engenheiro de reservatórios a avaliação das opções que podem gerar diferentes tipos de controle da produção.

Quanto às alternativas de controle proporcionadas, as válvulas podem ser classificadas em três categorias: abre-fecha ou *on-off*, multiposição e variação contínua. Em geral, válvulas do tipo abre-fecha possuem apenas dois estágios: totalmente abertas ou totalmente fechadas. Esses estágios podem ser reversíveis ou irreversíveis. As válvulas com controle reversível podem variar entre os estágios aberto e fechado, enquanto válvulas com controle irreversível não podem voltar ao estágio aberto depois de fechadas. As válvulas multiposição possuem diversos estágios de abertura e, em teoria, nas válvulas de variação contínua é possível conseguir um controle infinitesimal da área de abertura ao fluxo. Entretanto, apesar de as válvulas de variação contínua proporcionarem maior flexibilidade, este tipo de válvula ainda não é encontrado facilmente na indústria exploração e produção petrolífera.

Vários trabalhos consideram diferentes alternativas de controle para a operação de válvulas. A válvula tipo abre-fecha é a mais comumente encontrada na literatura. Silva e Schiozer (2009), Dehdari (2011), Essen et al. (2009) apresentam em seus trabalhos apenas o uso de válvulas de controle tipo abre-fecha. Emerick e Portella apresentam um trabalho em que comparam válvulas abre-fecha, chamadas de binárias nesse trabalho, e válvulas multiposição. Já Pinto (2013) e Al-

meida et al. (2010) apresentam avaliações do uso de válvulas de controle com alternativas do tipo abre-fecha e abertura contínua. Portanto, os estudos utilizam representações de válvulas com diferentes tipos de regulagem.

2.2 Criação e avaliação de alternativas na engenharia de reservatórios

Em geral, a avaliação de estratégias ou alternativas para solucionar problemas de engenharia de reservatórios é complexa. A avaliação envolve uma organização da área de engenharia para estabelecer as necessidades e solucionar diferentes problemas. Esta tarefa demanda tempo e critérios para se obter uma boa alternativa. Da mesma forma, a tarefa de avaliar poços inteligentes envolve várias atividades de engenharia para solucionar diferentes problemas, que podem ser solucionadas de forma combinada ou não. Este capítulo tem o objetivo de fundamentar o tema seleção de estratégias.

A primeira parte desta seção apresenta um fluxograma de trabalho necessário para criar alternativas plausíveis para compor um portfólio de opções que devem ser avaliadas. A segunda parte apresenta um resumo da teoria dos sistemas. São apresentadas as definições de sistemas e modelos e alguns conceitos sobre avaliação de sistemas e estratégias de processos de engenharia. A partir desta teoria foram concebidos os métodos de otimização e avaliação de número e posição das válvulas de controle.

2.2.1 Criação de alternativas

O primeiro passo para a seleção de estratégias ou alternativas para solucionar problemas de engenharia é estruturar um conjunto de alternativas plausíveis para solucionar uma demanda. Entretanto, para definir de forma criteriosa as alternativas e avaliá-las de forma adequada, é necessária a organização dos estudos e análises das estratégias. Segundo Rudd e Watson (1968), de forma geral, a seleção de estratégias plausíveis segue o fluxograma apresentando na Figura 2-3:

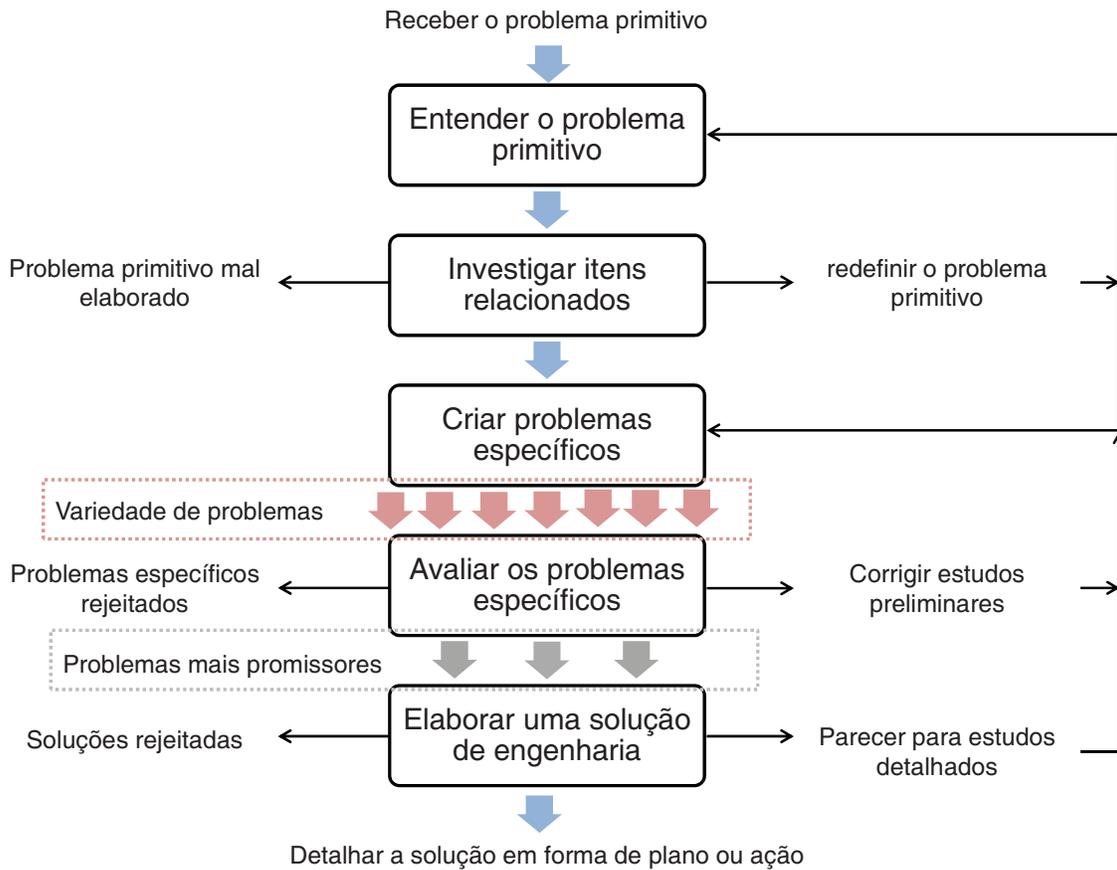


Figura 2-3: Criação de alternativas plausíveis (Adaptado de Rudd e Watson, 1968)

O problema primitivo pode ser definido como um problema geral, que não pode ser estabelecido de uma forma precisa e representa uma necessidade (Rudd e Watson, 1968). Por exemplo, existe a necessidade de aumentar a extração óleo de um campo ou aumentar a lucratividade do empreendimento. A solução deste problema pode adquirir várias formas como incluir mais poços em uma estratégia de produção, aplicar diferentes técnicas de recuperação ou usar poços inteligentes. Portanto, diz-se que nesse estágio o problema se encontra na sua forma primitiva.

Da mesma forma, a definição da melhor estratégia para aplicação de poços inteligentes pode ser considerada um problema primitivo, se for avaliada de forma isolada do restante da estratégia de produção do campo. Faz-se necessário estabelecer quais as alternativas são plausíveis para constituir uma solução com poços inteligentes. Exemplificando, questões sobre o tipo de válvula, a definição de número e posição de válvulas, e os sistemas de transmissão e controle a se-

rem utilizados. Portanto, a avaliação do uso de poços inteligentes, na sua visão mais geral, é um problema que depende de muitas análises de diferentes aspectos.

Com o entendimento e estabelecimento do problema primitivo, o engenheiro deve avaliar as questões relacionadas ao problema que podem inviabilizar a sua solução. Itens como a disponibilidade de equipamentos para instalação, a disponibilidade de válvulas em tempo adequado e a possibilidade de instalação de válvulas são alguns exemplos que devem ser analisados. Caso existam itens que impossibilitem a solução do problema, o entendimento sobre o problema primitivo deve ser revisto e o ponto de vista das análises deve ser mudado.

A definição de diferentes problemas específicos deve ser executada para avaliar diferentes alternativas. Uma aplicação de poços inteligentes pode ser avaliada sobre o ponto de vista de diferentes alternativas, cada uma formando um problema específico a ser solucionado. Por exemplo, pode-se avaliar uma válvula de controle de tipo abre-fecha e uma válvula de controle com variação contínua em diferentes problemas. Problemas específicos podem ser criados para avaliar diferentes alternativas de sistemas de transmissão, tipos de sensores etc. Portanto, como enfatiza Rudd e Watson (1968), o sucesso do projeto de engenharia, do ponto de vista de apresentar a melhor solução, depende da qualidade e variedade dos problemas específicos criados para avaliar diferentes alternativas.

Em seguida, cada problema específico é testado para garantir que uma alternativa estudada não seja inviável ou muito inferior às demais alternativas. Este passo demanda soluções menos precisas, mas que avaliem de forma rápida os problemas específicos criados. É necessário, de uma forma mais geral, o valor de cada alternativa para compará-las. Portanto, devido à variedade de alternativas nesta etapa, uma avaliação mais criteriosa deve ser evitada.

Por último, uma avaliação mais criteriosa é realizada para as alternativas mais promissoras. Efetua-se uma seleção detalhada dos equipamentos por meio da determinação das condições operacionais ótimas, necessárias para que a alternativa atinja a melhor solução.

No contexto desta seção, observa-se que o trabalho de engenharia para aplicar poços inteligentes pode ser dispendioso e inclui uma série de avaliações, decisões e análises para gerar alternativas plausíveis e selecionar a melhor alternativa. Portanto, métodos de avaliações rápidas são importantes mesmo quando os poços inteligentes são avaliados de forma isolada.

2.2.2 Teoria dos sistemas de engenharia de reservatórios

Cada problema específico criado para avaliar alternativas plausíveis é avaliado por diferentes técnicas que vão desde a formulação e caracterização do sistema até a solução do problema. Essas técnicas envolvem conceitos de sistemas, modelos, otimização e avaliação que são introduzidos nesta seção.

2.2.2.1 Definição e hierarquia de sistemas

A avaliação de estratégias envolve a quantificação do valor das alternativas para compará-las e selecionar a melhor estratégia. Para quantificar o valor de uma estratégia é necessário que a alternativa seja discriminada de uma forma matemática e propícia de valoração. A quantificação é feita através da definição de sistemas, modelos e definição de critérios econômicos. Nesta seção, são apresentados alguns aspectos relativos à aplicação da teoria dos sistemas de engenharia para avaliar estratégias por meio de simulações de reservatórios. O objetivo é definir os termos utilizados nos próximos capítulos e fundamentar o conhecimento para a avaliação de poços inteligentes.

Um sistema pode ser definido como um conjunto de elementos interconectados que interagem de modo que formem uma unidade no desempenho de uma função em comum (Delaney e Vaccari, 1989). Apesar do amplo uso que se pode dar ao conceito de sistemas, este conceito é importante para a avaliação de alternativas e possui dois aspectos fundamentais: a unidade e a possibilidade de decomposição do sistema em elementos, que podem originar subsistemas. Considerando a possibilidade de transformar uma alternativa em um sistema, é necessário definir a qual sistema a alternativa faz parte, quais tipos de subsistemas podem ser criados com base em uma alternativa e qual a relação entre esses sistemas. Os subsistemas interagem por meio de intercâmbio energético, de informação, etc. Portanto, um sistema é uma hierarquia de subsistemas que se influenciam mutuamente.

Costa (1972) apresenta as seguintes perguntas necessárias para definir corretamente um sistema e seus subsistemas:

- o sistema em estudo pertence a qual sistema mais amplo, e em que ele contribui para as características do sistema mais amplo?

- quais os outros subsistemas do sistema mais amplo e qual sua relação com o sistema que se deseja avaliar?
- quais subsistemas constituem o sistema de estudo?

Assim como aponta Costa (1972), é preciso considerar que um subsistema é uma parte de um sistema mais amplo que, tomada isoladamente, tem as características de um sistema e pode ser avaliado como tal. Sendo assim, a definição do sistema e seus subsistemas depende de alguns fatores de ordem organizacional e prática, como:

- o trabalho que um grupo encarregado do projeto de um determinado subsistema deve ser realizado sem necessitar de informações e diretivas muito frequentes dos grupos que avaliam o sistema e outros subsistemas;
- o subsistema deve ter uma função relevante e essencial a desempenhar na obtenção dos objetivos designados para o sistema a que pertence;
- deve ter número de entradas e saídas condizente com os recursos disponíveis para avaliação e as interfaces entre os subsistemas devem ser construídas de tal modo que minimizem problemas de inter-relacionamento.

Seguindo esta definição de sistemas, os poços inteligentes estão inseridos no sistema mais amplo do sistema produtivo do reservatório. De fato, os poços inteligentes tem o objetivo de alterar as condições do sistema de reservatórios de uma forma que beneficie toda a economia do campo. Um sistema de poços inteligentes é formado pelas partes que o compõe como, sensores, controladores, transmissão e elementos finais de controle. Cada uma dessas partes pode ser dividida em um sistema. Entretanto, a inter-relação com o sistema mais amplo ocorre pelos elementos finais de controle, ou seja, as válvulas, as quais tem seu comando diretamente definido pelos controladores.

Em geral, para a engenharia de reservatórios, a parte do sistema de poços inteligentes que é alvo de avaliação é o sistema de controle formado pelos controladores. Portanto, considera-se fixo um determinado tipo de elemento final, um determinado tipo de sistema de monitoramento, considera-se ainda que o sistema de transmissão de dados não interfere na decisão e foca-se no estudo de como controlar as válvulas para avaliar o desempenho econômico do campo. Este tipo

de abordagem está presente em praticamente todos os trabalhos científicos voltados à engenharia de reservatórios, como Yeten et al. (2004), Su (2009), Zandvliet (2007), Gharbi (2005), entre outros.

2.2.2.2 Definição de modelos e aplicação a poços inteligentes

Um modelo é uma representação dos aspectos essenciais de um sistema existente, ou a ser construído. Os modelos podem ser uma réplica, um protótipo ou uma representação simbólica (Delaney e Vaccari, 1989). Já os modelos simbólicos podem empregar equações matemáticas (modelos matemáticos), diagramas, modelos verbais entre outros, para designar uma propriedade do sistema. Neste trabalho, apenas os modelos matemáticos são alvo de estudo. Portanto, para avaliar um sistema, é necessária a sua representação na forma de um modelo (modelagem), que represente o sistema real e que possibilite uma avaliação técnica de uma alternativa.

A construção de um modelo está relacionada diretamente as seguintes questões (Edgar et al., 2001):

1. deveria este processo ou sistema ser modelado em um nível fenomenológico através de equações fundamentais?
2. qual o nível de esforços computacionais e humanos (tempo, custos, recursos humanos) é necessário para modelar e avaliar este sistema?
3. esse sistema pode ser adequadamente representado por princípios físicos?
4. qual a precisão desejada para o modelo e como a precisão afeta os resultados obtidos?
5. quais tipos de dados podem ser disponibilizados para verificação do modelo?
6. este sistema é composto por sistemas menores e mais simples que podem ser mais facilmente analisados?

A resposta para cada pergunta depende do problema que se está analisando. Entretanto, de forma geral, a modelagem de poços inteligentes tem sido possível com as tecnologias e conhecimentos disponíveis, obtendo respostas tão precisas quanto à demanda dos modelos de reservatório permitem. Entretanto, alguns tipos avaliações mais complexas, que dependem do uso de mui-

tas simulações e ferramentas sofisticadas, podem não atender aos quesitos práticos de alguns estudos.

Para introduzir a ideia geral da construção de um modelo de forma prática, a Figura 2-4 mostra um fluxograma de atividades para a geração de um modelo qualquer. Segundo Edgar et al. (2001), pode-se dividir a construção de um modelo em 4 fases: 1) a formulação do problema, 2) análises preliminares e detalhadas, 3) avaliação e 4) aplicação. Observa-se que as atividades para o desenvolvimento de um modelo são interativas.

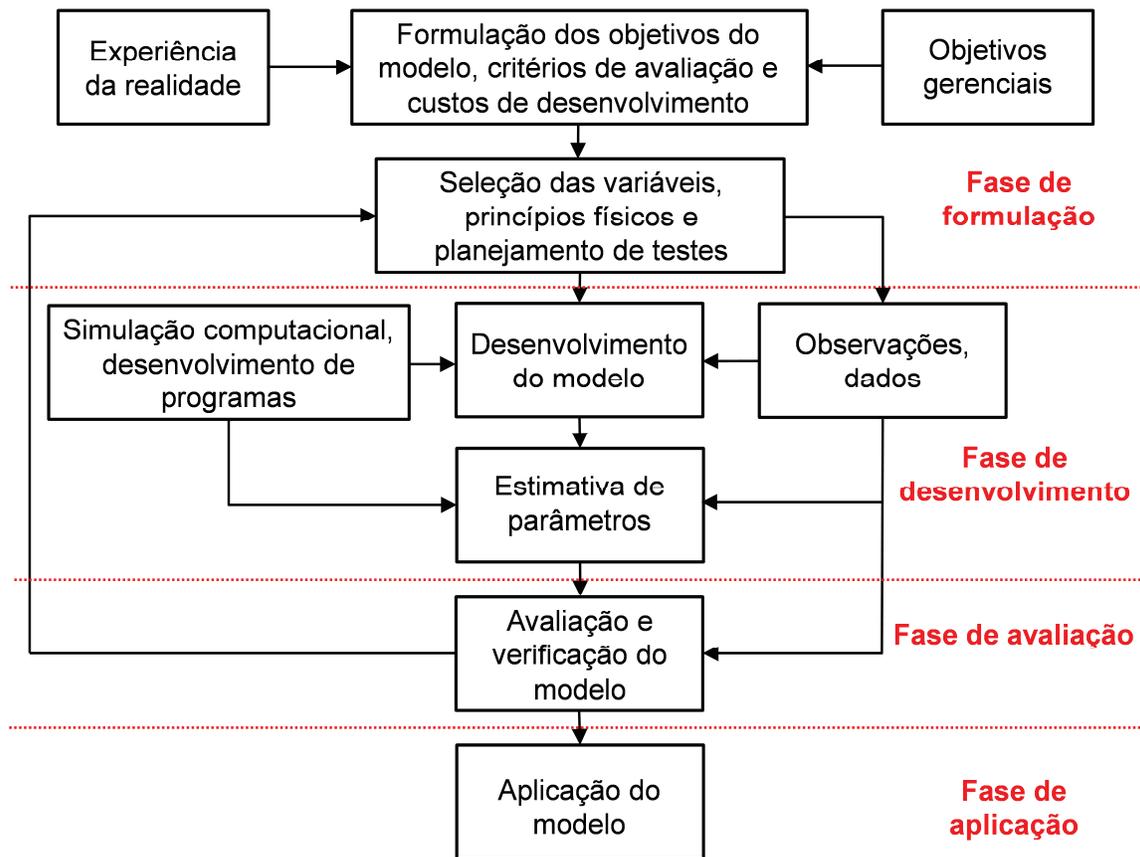


Figura 2-4: Principais atividades para a construção de um modelo para aplicação (Adaptada de Edgar et al., 2001).

A formulação do problema envolve a definição de objetivos, parâmetros e variáveis do sistema, bem como o planejamento do processo de criação de um modelo. Para entendimento do modelo e sua construção é necessário definir alguns termos. Esses termos serão utilizados no de-

envolvimento desta tese. A Tabela 2-1 apresenta uma lista de termos necessária para a definição de um modelo (Rudd e Watson, 1968, Delaney e Vaccari, 1989; Edgar, et al., 2001).

Tabela 2-1: Lista de termos utilizados para a definição e validação de um modelo.

Termo	Definição	Exemplo
Variáveis dependentes	São as variáveis de saída do modelo; a resposta às condições impostas ao modelo.	VPL, fator de recuperação, produção de óleo
Variáveis independentes ou variáveis de decisão	São as variáveis que se pode alterar ao longo da avaliação. Representam as alternativas que se deseja avaliar.	Número de poços, método de recuperação
Variáveis de projeto	Variáveis independentes que indicam uma opção física no espaço, como a escolha de um equipamento ou a sua posição	Número e posição de válvulas de controle em um campo
Variáveis de controle	Variáveis independentes que indicam uma mudança no tempo a partir do controle de um equipamento.	Abertura e fechamento de válvulas
Parâmetros	Significa coeficientes. Os parâmetros podem ser uma entrada do modelo ou uma condição inicial, não existe controle sobre eles.	Permeabilidade, saturação inicial
Crítérios de avaliação	Crítérios utilizados para validar um modelo. O modelo deve ter conformidade lógica, com as hipóteses levantadas e com o comportamento esperado.	Verificar se o controle das válvulas altera de forma lógica a vazão de uma região e poço

O desenvolvimento e identificação de um modelo matemático são etapas na quais se estabelece quais os fenômenos precisam ser descritos para representar o sistema e suas interações, identifica-se quais equações devem ser consideradas para descrevê-lo adequadamente e determinam-se os parâmetros das equações para ajustá-lo à realidade. Estas etapas fazem parte da caracterização inicial do sistema. Esta caracterização do sistema se refere à construção inicial do modelo e não à avaliação da validade do modelo após a aquisição de mais informações. O objetivo é determinar os parâmetros do sistema para que ele apresente um comportamento adequado com a realidade e também adequado à avaliação das alternativas. A validação do modelo é feita por meio da análise de alguns critérios utilizados para avaliar o comportamento do modelo. Caso este modelo esteja em conformidade com o comportamento esperado, ele pode ser disponibilizado, caso não esteja, o modelo precisa ser reformulado.

2.2.2.3 Avaliação de sistemas

As atividades para a solução de um problema de engenharia por meio da avaliação de um sistema podem ser distribuídas pelo fluxograma formado pela inter-relação entre processos de caracterização do sistema e processos para a determinação da solução (Figura 2-5). Costa (1972) atribui essas atividades à engenharia de sistemas. Portanto, em casos práticos, não se pode dissociar a caracterização do sistema da determinação de sua solução. Apesar de esta tese ter o foco na determinação de uma solução por meio de técnicas de otimização, é importante destacar que essas duas atividades não estão separadas em casos práticos e isto exige um planejamento para execução das duas atividades em um tempo limitado.

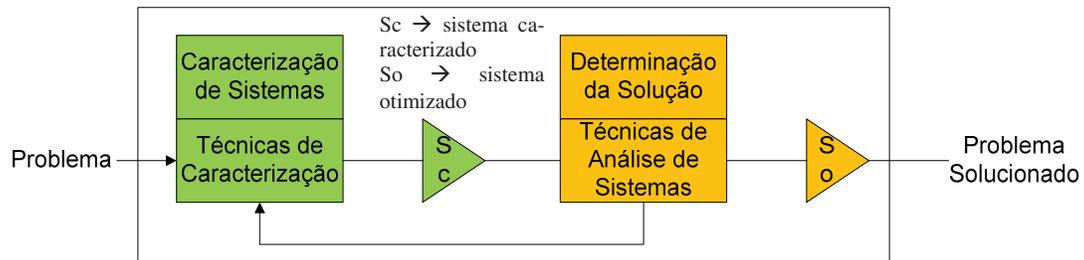


Figura 2-5: Esquema de atividades da engenharia de sistemas (Costa, 1972).

A escolha de uma solução é realizada utilizando técnicas de otimização e seleção (Costa, 1972). A otimização é necessária para que cada uma das alternativas seja avaliada pelo seu maior potencial, de modo a evitar a polarização ou a parcialidade no momento de seleção. A seleção é a tomada de decisão, na qual a melhor alternativa é escolhida segundo os fatores que representam o desempenho do projeto. Os projetos podem ser avaliados por diferentes fatores, mas é importante que exista uma relação entre eles para que seja possível comparar as estratégias. A Figura 2-6 mostra alguns fatores possíveis para avaliação. Entretanto, só os fatores que influenciam nas avaliações devem ser considerados.

Para avaliação de poços inteligentes utilizando simulação de reservatórios, as etapas de caracterização e otimização podem demandar um tempo considerável. Soma-se a este fato a necessidade de avaliação de várias alternativas de sistemas de poços inteligentes e, além disso, a possibilidade de integrar a avaliação de sistemas de poços inteligentes à avaliação de toda a estratégia de produção de um campo. Através dos conceitos introduzidos nesta seção, pode-se concluir que

as etapas práticas para seleccionar uma estratégia que envolva poços inteligentes podem demandar um esforço considerável da área de engenharia.

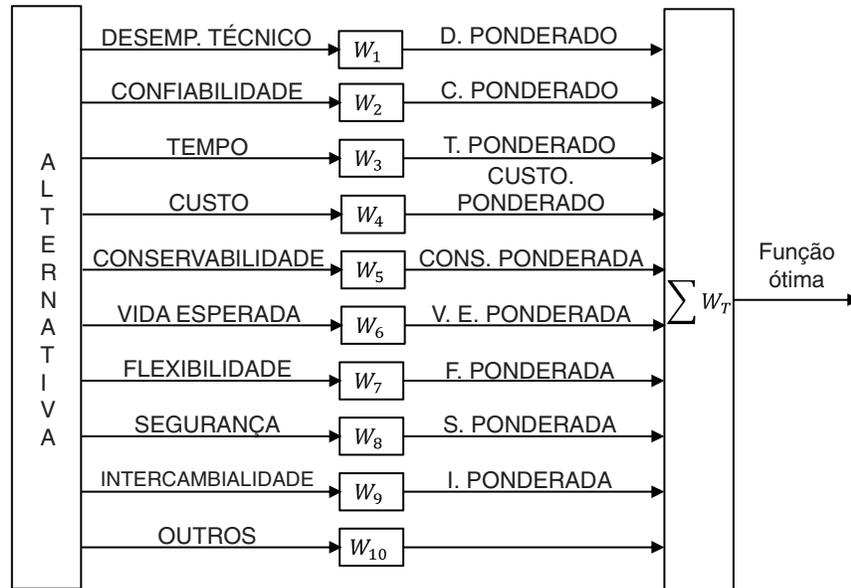


Figura 2-6: Diferentes aspectos que podem ser utilizados para avaliar uma alternativa.

2.3 Modelagem estrutural de poços inteligentes

Neste trabalho, o posicionamento de uma válvula de controle é definido como a localização de uma região selada do poço e delimitada por elementos de isolamento (*packers*), na qual o escoamento proveniente desta região específica do furo do poço é exclusivamente direcionado para uma única válvula de controle. Portanto, o posicionamento de uma válvula de controle é de fato, o posicionamento de uma região do poço que será isolada para fins de monitoramento e controle.

A Figura 2-7 apresenta o esquema de um produtor completado com ICV. Cada ICV controla o escoamento de uma região específica do furo do poço para a coluna de produção. A região controlada pela ICV i ao longo da trajetória, $WT(s)$, do poço j , isolada pelos elementos de isolamento (*packers*), pode ser completamente definida pela especificação da fronteira superior ($s_1^{i,j}$) e pela fronteira inferior ($s_2^{i,j}$). Outra forma de delimitar a região é a especificação de uma das fronteiras e a definição da distância entre os dois elementos de isolamento ($d^{i,j}$). Neste trabalho, utilizam-se a posição do elemento de isolamento superior e a distância entre os dois elemen-

tos para definir a região de controle de uma válvula. Os parâmetros s_1 e d são chamados de parâmetros geométricos.

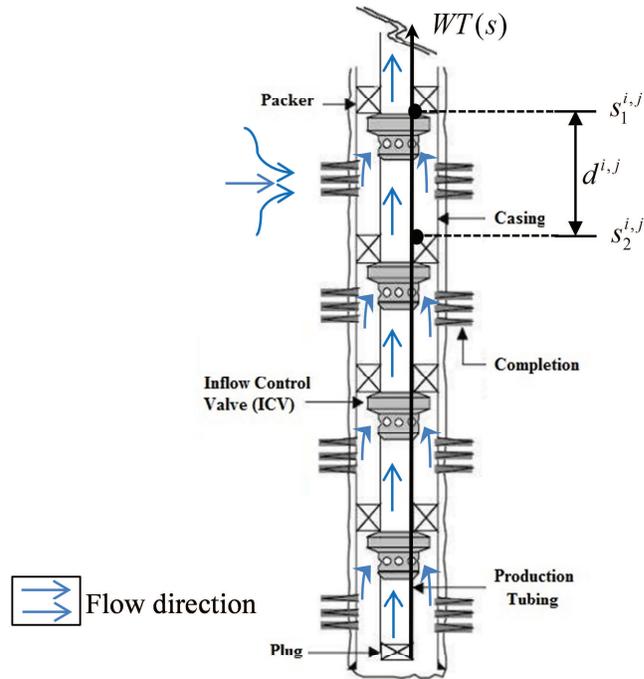


Figura 2-7: Esquema representativo de um poço completado com válvulas de controle (ICV).

De acordo com o modelo estrutural proposto, um poço produtor (j) completado com um número de ICV igual a n_v pode ser criado pelo vetor \hat{v} , composto pelos parâmetros geométricos $s_1^{i,j}$ e $d^{i,j}$, com dimensão de $2 \times n_v$, como mostrado em (1).

$$\hat{v}^T = \{s^{1,j} \dots s^{n_v,j} d^{1,j} \dots d^{n_v,j}\} \quad (1)$$

Neste trabalho, utiliza-se como ponto de referência para a trajetória de cada poço o ponto inicial de contato do poço com o reservatório. Portanto, o ponto inicial é representado por $WT(0)$ e o ponto final é o comprimento do poço no reservatório, $WT(wl)$. O índice i , relativo a cada ICV, é ordenado para que a válvula mais próxima ao topo do reservatório tenha o menor índice.

2.4 Sistemas de controle de poços inteligentes

O sistema de controle é diretamente relacionado com o tipo de válvula de controle que é utilizada. Entretanto, de forma geral, as válvulas de controle de vazão por estrangulamento da área de passagem de fluido, obedecem às seguintes equações para o escoamento multifásico no reservatório (2) e no interior da válvula de controle (3) (Valvatne et al., 2003; Dake, 1978; Bequete, 2003):

$$F^{fm}(t) = \sum_{ph=1}^p g(x,t) \times PI \times \lambda^{ph}(t) \times (P_{BH} - P_r) = C_{ICV} \times f(x,t) \times \sqrt{\Delta P_{ICV}(t) / sg} \quad (2)$$

$$F^{fm}(t) = C_{ICV} \times f(x,t) \times \sqrt{\Delta P_{ICV}(t) / sg} \quad (3)$$

Portanto, existe uma relação entre o escoamento que passa através da válvula de controle com o escoamento do reservatório para o poço produtor. A variável x é a fração da área da abertura da válvula que está aberta, sendo que $x = \{b \in \mathfrak{R} \mid 0 \leq b \leq 1\}$.

Considerando que todos os parâmetros mostrados na equação (2) são disponibilizados pelas saídas da simulação de reservatórios, pode-se relacionar diretamente o valor de x com o escoamento multifásico. Neste trabalho, um modelo tipo *feedback control* foi adotado para controlar o processo dinâmico do escoamento multifásico do reservatório (Ogunnaike e Ray, 1994; Seborg et al., 1989). O esquema do modelo adotado está esquematizado na Figura 2-8.

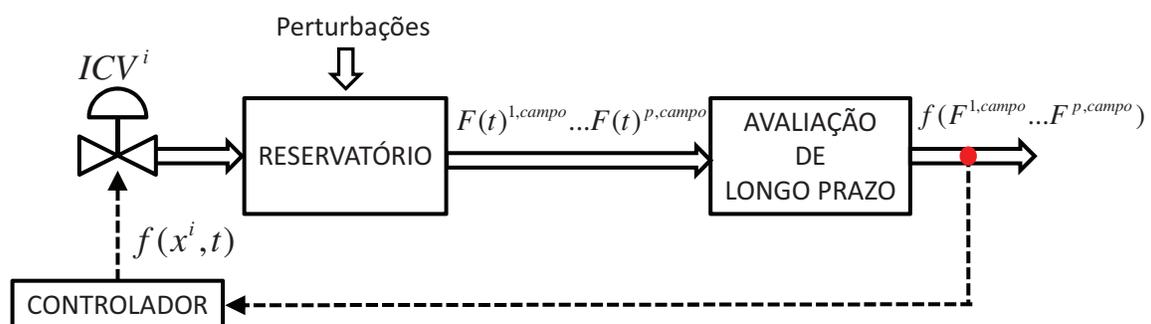


Figura 2-8: Modelo de controle adotado para operação das válvulas de controle.

Neste modelo as perturbações são causadas pelas alterações no sistema devido às mudanças causadas pelas alterações nas válvulas e outros tipos de alteração que levam o estado do reserva-

tório para uma condição não desejada. No esquema, os dados coletados do escoamento do reservatório são enviados para uma avaliação de longo prazo. Uma avaliação de longo prazo é realizada com base na previsão da produção. A avaliação é repassada ao controlador que define as novas condições da ICV. A ICV é acionada e altera as condições do reservatório, retornando o ciclo de avaliações.

Considerando todo o tempo da vida útil de um campo, todas as alterações na abertura da seção de passagem das válvulas de controle formam a matriz A (4).

$$A = \begin{pmatrix} x^{k=1,w=1,v=1} & x^{k=2,w=1,v=1} & \dots & x^{k=n_t,w=1,v=1} \\ x^{k=1,w=1,v=2} & x^{k=2,w=1,v=2} & \dots & x^{k=n_t,w=1,v=2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x^{k=1,w=1,v=n_v^1} & x^{k=2,w=1,v=n_v^1} & \dots & x^{k=n_t,w=1,v=n_v^1} \\ x^{k=1,w=2,v=1} & x^{k=2,w=2,v=1} & \dots & x^{k=n_t,w=2,v=1} \\ x^{k=1,w=2,v=2} & x^{k=2,w=2,v=2} & \dots & x^{k=n_t,w=2,v=2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x^{k=1,w=2,v=n_v^2} & x^{k=2,w=2,v=n_v^2} & \dots & x^{k=n_t,w=2,v=n_v^2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x^{k=1,w=n_w,v=1} & x^{k=2,w=n_w,v=1} & \dots & x^{k=n_t,w=n_w,v=1} \\ x^{k=1,w=n_w,v=2} & x^{k=2,w=n_w,v=2} & \dots & x^{k=n_t,w=n_w,v=2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x^{k=1,w=n_w,v=n_v^{n_w}} & x^{k=2,w=n_w,v=n_v^{n_w}} & \dots & x^{k=n_t,w=n_w,v=n_v^{n_w}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} D^1 & D^2 & \dots & D^{n_t} \end{pmatrix}$$

Em que, $k = \{a \in N^* \mid a \leq n_t\}$ $w = \{b \in N^* \mid b \leq n_w\}$ $v = \{c \in N^* \mid c \leq n_v^{n_w}\}$. Na matriz A , as colunas representam o tempo discretizado, sendo que para cada tempo, um vetor de valores de x para todas as válvulas do campo precisa ser definido por uma decisão D . Cada decisão é tomada com base numa vazão desejada, como definido em (5). As matrizes A e T são ligadas pela equação (2), sendo a matriz T composta pelas vazões que podem ser controladas pelo fechamento e abertura de válvulas.

$$T = \begin{pmatrix} q^{k=1, w=1, v=1} & q^{k=2, w=1, v=1} & \dots & q^{k=n_t, w=1, v=1} \\ q^{k=1, w=1, v=2} & q^{k=2, w=1, v=2} & \dots & q^{k=n_t, w=1, v=2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ q^{k=1, w=1, v=n_v^1} & q^{k=2, w=1, v=n_v^1} & \dots & q^{k=n_t, w=1, v=n_v^1} \\ q^{k=1, w=2, v=1} & q^{k=2, w=2, v=1} & \dots & q^{k=n_t, w=2, v=1} \\ q^{k=1, w=2, v=2} & q^{k=2, w=2, v=2} & \dots & q^{k=n_t, w=2, v=2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ q^{k=1, w=2, v=n_v^2} & q^{k=2, w=2, v=n_v^2} & \dots & q^{k=n_t, w=2, v=n_v^2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ q^{k=1, w=n_w, v=1} & q^{k=2, w=n_w, v=1} & \dots & q^{k=n_t, w=n_w, v=1} \\ q^{k=1, w=n_w, v=2} & q^{k=2, w=n_w, v=2} & \dots & q^{k=n_t, w=n_w, v=2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ q^{k=1, w=n_w, v=n_v^{n_w}} & q^{k=2, w=n_w, v=n_v^{n_w}} & \dots & q^{k=n_t, w=n_w, v=n_v^{n_w}} \\ \hline D^1 & D^2 & \dots & D^{n_t} \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.5 Estratégia de produção de petróleo

A produção de petróleo é uma tarefa que envolve a instalação e operação de diversos equipamentos. As avaliações de engenharia são feitas por diferentes profissionais, muitas vezes de forma isolada, sem a integração de todas as partes do sistema de produção. A decisão de avaliar variáveis do sistema de forma conjunta é complexa e demanda uma avaliação criteriosa, pois a avaliação de muitas variáveis em conjunto pode resultar em avaliações ineficientes. Além disso, diferentes pontos de vista sobre a estratégia de produção e os objetivos das decisões tomadas mudam dependendo do estágio produtivo do campo. Portanto, definir uma estratégia de produção de petróleo é uma tarefa que requer diferentes decisões que por sua vez requerem diferentes avaliações do sistema produtivo.

Para a engenharia de reservatórios, a estratégia de produção é uma série de diretrizes ou especificações gerais de características importantes do sistema produtivo (infraestrutura e operação) que significativamente e interativamente impactam na expectativa econômica do campo. Essas características envolvem muitas especificações que delimitam os projetos de equipamentos e suas

operações, requisitos para o desenvolvimento de projetos de outras áreas, como perfuração, poços e instalações de superfície. Por exemplo, a especificação do método de recuperação é importante para a definição de que tipo de equipamentos de superfície e quais estruturas de poços devem ser considerados. Outro exemplo são as especificações dos limites físicos de produção, que são necessários para o dimensionamento de separados e sistemas de armazenamento.

O objetivo desta seção é apresentar de forma geral os desafios da engenharia de reservatórios para a definição da estratégia de produção no seu estágio inicial e mostrar que a inclusão de muitas variáveis de decisão nesse estágio demanda técnicas de otimização eficientes. Inicialmente, apresenta-se uma visão geral sobre estratégia de produção. Em seguida são apresentadas as técnicas utilizadas na literatura para avaliar e otimizar a estratégia de produção.

2.5.1 Complexidade das estratégias de produção de petróleo

Alguns fatores contribuem para a complexidade de uma estratégia de produção. Entre eles podem-se citar:

- altos investimentos;
- grande quantidade de equipamentos que compõe o sistema produtivo;
- necessidade de alteração de estratégia ao longo da vida útil do campo;
- necessidade de controle de um grande número de equipamentos;
- incertezas envolvidas em cada decisão.

Aramayo et al. (2013) realizaram um estudo para entender os fatores que influenciam o gerenciamento de projetos de exploração e produção (E&P) na Petrobras S.A. e desenvolveram uma metodologia de gerenciamento de projetos. Foram constatados diversos fatores que dificultam a execução de projetos, entre eles, falta de procedimentos específicos, falta de comunicação entre equipes de projetos e constantes mudanças. Pode-se observar que existe uma variedade de projetos sendo executados de forma conjunta e que a integração entre eles não é facilmente gerenciável.

Estas mesmas dificuldades podem ser verificadas se avaliarmos os estudos de engenharia de reservatório. Observa-se que diferentes trabalhos tratam de assuntos de forma isolada, como

otimização da produção (Asadollahi et al., 2012; Willersrud et al., 2013; Rahmawati et al., 2012), otimização de capacidades de plataforma (Wang et al., 2002; Kosmidis et al., 2005; Magalhães et al., 2005), otimização do número e localização de poços (Ebadat e Karimaghaee, 2012; Zhang et al., 2010; Beckner e Song, 1995; Nakajima e Schiozer, 2003; Cullick et al., 2005), entre outros. Entretanto, a solução de cada um desses problemas específicos é uma parte do problema da definição da estratégia de produção de petróleo.

Portanto, cabem os questionamentos discutidos na seção 2.2.2.1. Como cada subsistema desenvolvido para solucionar um problema menor se relaciona com o sistema maior? Como integrar os subsistemas avaliados? Qual a influência de cada subsistema avaliado? Cabem ainda questionamentos de ordem prática como: os métodos são adequados a esta integração? O tempo requerido para cada avaliação é compatível com a análise da estratégia de produção como um todo?

Alguns trabalhos tentam combinar diferentes avaliações para a definição da solução do problema mais completo da seleção da estratégia de produção. Mezzomo e Schiozer (2002) e Ravagnani et al. (2011) apresentam um trabalho que define algumas etapas para avaliação de diferentes variáveis de decisão de uma estratégia de produção. Nesse trabalho, observa-se que o número de variáveis que influenciam no resultado final pode ser grande e que otimizar as variáveis de decisão de forma isolada por meio de diferentes métodos pode não ser a maneira mais adequada de chegar a melhor solução.

Portanto, a definição da estratégia de produção requer diferentes análises que têm sido realizadas, em geral, de forma isolada. A combinação dessas técnicas para a definição da estratégia de produção completa pode requerer métodos que apresentem características específicas de eficiência e esforço necessário para executá-la, bem como a disponibilidade de ferramentas computacionais. Entretanto, uma estratégia de produção nunca é igual à outra, assim como os esforços para selecionar estratégias de produção divergem em cada projeto e os métodos podem ser diferentes.

A avaliação da estratégia de produção de um campo de petróleo não é definida em um só momento, de forma estática. A definição da estratégia de desenvolvimento para um campo de petróleo depende da fase da produção em que este se encontra. Dessa forma, na fase de planejamento, a análise da estratégia é mais geral e contempla a definição de maior número de variáveis de

decisão, como número, tipo e localização dos poços, assim como as suas condições operacionais. Espera-se que em fases mais avançadas, a estratégia de produção já esteja estabelecida e requeira modificações de menor ordem de grandeza e, também, menores investimentos.

Para exemplificar a complexidade da estratégia de produção de petróleo e sua relação com os estudos de engenharia de reservatórios, a Figura 2-9 apresenta um esquema simplificado do esforço requerido das equipes de engenharia para avaliar a estratégia de produção durante a vida útil de um campo de petróleo. Este esquema hipotético tem o objetivo de traduzir de forma aproximada as dificuldades na seleção de estratégias durante a vida do campo e é baseado nos esquemas propostos por Costa (1972) e por Sage (1977) para mostrar a relação entre engenharia de sistemas e as fases de um projeto. As fases nem sempre são bem definidas no tempo e podem coexistir por determinado tempo da vida útil do campo.

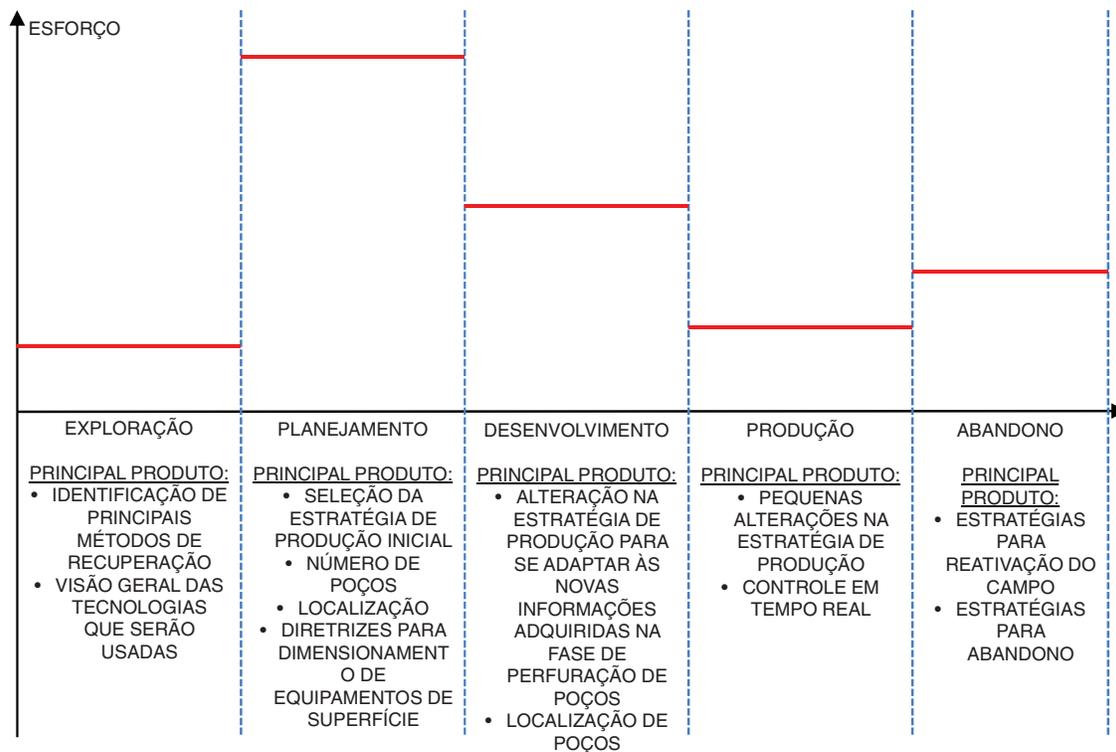


Figura 2-9: Esquema simplificado da cronologia relativa aos esforços que se requer da engenharia de reservatórios para a seleção de estratégias de produção.

Para casos em que o esquema da Figura 2-9 representa as etapas do esforço da engenharia de reservatórios, na fase de exploração, o corpo técnico da empresa deve identificar os principais métodos de recuperação que são aplicáveis ao tipo de campo. Isto é, restringir o número de alternativas de métodos de recuperação com base em estudos teóricos e analogia com campos com características similares. Nessa fase, os modelos do sistema estão sendo criados e não é possível fazer uma avaliação criteriosa sobre a estratégia de produção.

A fase de planejamento é a que necessita de maior esforço para sua execução, devido aos problemas de engenharia serem de maior escala e envolverem mais riscos e recursos financeiros. Portanto, é na fase de planejamento que se exige mais da interação entre equipes, existe maior influência entre as variáveis de decisão e se depende mais fortemente de métodos mais eficientes. Nessa fase, define-se a estratégia de produção que será utilizada como base para o desenvolvimento do campo.

A fase de desenvolvimento é a fase na qual todos os equipamentos destinados à produção são projetados, fabricados e instalados. Entre eles pode-se citar a perfuração de poços de produção, a localização e instalação de plataformas e do sistema de produção de superfície e a conexão entre poços e plataformas. Devido principalmente à perfuração dos poços, nessa fase a engenharia de reservatórios atua na modificação da estratégia de produção com base em novas informações coletadas ao longo do desenvolvimento.

A fase de produção é a fase em que o sistema produtivo está instalado e é necessário operá-lo da melhor forma possível. Além disso, devido às incertezas e simplificações existentes no planejamento e desenvolvimento do projeto, algumas modificações de infraestrutura no sistema produtivo são necessárias para se adequar à realidade. Portanto, a engenharia de reservatórios desenvolve estudos para regular as vazões e pressões de poços e válvulas, bem como, executa uma reciclagem contínua do projeto para identificar a necessidade de correções na estratégia e a viabilidade de implantação de novas tecnologias.

A fase de abandono é a fase na qual o campo encontra-se bastante depletado e inicia-se o processo de reavaliação do sistema e a desativação de equipamentos. A reavaliação do sistema consiste no estudo para identificar a viabilidade de aplicação de novas técnicas para estimular e

prolongar a produção do campo. Caso essa reavaliação aponte a inviabilidade de prosseguimento do projeto, os equipamentos são desinstalados e acondicionados conforme a legislação vigente.

2.5.2 Avaliação econômica de estratégias de produção

A maneira mais usual de avaliar estratégias e comparar diferentes alternativas é a utilização do Valor Presente Líquido (VPL) (Alhuthali et al., 2010; Yeten et al., 2004; Nævdal et al., 2006). Entretanto, as estratégias e principalmente poços inteligentes, também têm sido avaliados por outros indicadores como o fator de recuperação final do campo (Yeten et al., 2004).

Na análise de campos de petróleo por meio de simulação de reservatórios, o fluxo de caixa líquido (FCL) pode ser calculado por uma função que considera a série prevista para a produção e injeção de fluidos, e parâmetros do modelo econômico (Ω), utilizado para relacionar o escoamento com o fluxo de caixa (6). Esta função inclui cálculos para estimar as receitas, custos operacionais, investimentos, impostos, entre outros. Com a série do FCL, calcula-se o VPL pela equação (7).

$$FCL(t) = f(F^f(t), \Omega) \quad (6)$$

$$VPL = \sum_{i=1}^n \frac{FCL(t^i)}{(1 + TMA)^i} \quad (7)$$

Neste trabalho, o foco da avaliação é na análise do VPL. Para o cálculo do VPL do campo, utiliza-se o modelo brasileiro que regula a taxaço sobre campos no regime de concessão (Pinto, 2013). Consideram-se para o cálculo do fluxo de caixa os seguintes fatores:

- investimento em exploração;
- investimento em plataforma;
- investimento em poços convencionais;
- investimento em poços inteligentes;
- receitas com a produção de óleo;
- custos operacionais da produção;

- custos operacionais da injeção;
- montante pago em royalties;
- montante pago em PIS/PASEP/COFINS;
- participação especial;
- impostos de renda e contribuição social.

Para o cálculo do VPL de poços inteligentes e completações de forma isolada do campo, utilizam-se apenas as receitas e os custos operacionais relativos à produção e à injeção.

2.6 Métodos aplicados à otimização de poços inteligentes

Um campo de petróleo pode ter várias válvulas instaladas em diversos poços e em diferentes regiões de cada poço. A determinação do projeto ótimo para uso de válvulas de controle é uma tarefa que envolve muitas variáveis de decisão e um espaço de solução complexo. Além disso, o projeto ótimo para o posicionamento de válvulas de controle depende de uma previsão sobre o controle futuro dessas válvulas, que também deve ser otimizado. Este fato aumenta significativamente a complexidade do problema de otimização. Portanto, em geral, pode-se considerar que o problema de otimizar o número e a posição de válvulas de controle é um problema de larga escala.

Vários trabalhos científicos têm se dedicado ao desenvolvimento de métodos de otimização para solucionar problemas que envolvem poços inteligentes utilizando a simulação de reservatórios como ferramenta para avaliação. Nesta seção, apresenta-se uma visão geral dos métodos utilizados na literatura. O objetivo é mostrar as causas que levam à necessidade de soluções mais eficientes, as abordagens utilizadas para determinar o número e posição de válvulas e a demanda computacional dos métodos utilizados na literatura. Pretende-se com isso demonstrar a necessidade de métodos eficientes para solucionar determinados problemas que envolvem poços inteligentes.

2.6.1 Desafios dos problemas práticos de otimização dentro da engenharia de reservatórios

Os desafios de engenharia para a avaliação de poços inteligentes são os mesmos apresentados para a estratégia de produção (seção 2.5). Poços inteligentes na prática devem ser adequados a fluxogramas de avaliação que envolvem diversos projetos, profissionais e a otimização de outros equipamentos que se influenciam mutuamente. Além disso, o prazo para apresentação de resultados é limitado por diversos aspectos da cadeia de avaliação e execução de projetos de engenharia de petróleo. Os seguintes itens mostram alguns aspectos que devem ser considerados na otimização de válvulas de controle:

- multidisciplinaridade;
- interação com outros projetos, como dimensionamento de poços e tubulações;
- interação com outras variáveis de decisão.

O projeto ótimo para localização das válvulas de controle ainda pode ser incluído dentro do processo de otimização de toda a estratégia de produção do campo. Com isso, o problema de otimização pode se tornar mais complexo e demandar ainda mais eficiência dos métodos de otimização. Silva (2008) mostrou que o uso de poços inteligentes pode impactar de forma significativa os indicadores de campo e influenciar na decisão de outras variáveis de decisão de uma estratégia de produção. Portanto, a otimização do uso de válvulas de controle é um problema complexo, com tempo limitado para execução e com recursos disponíveis para avaliá-los também limitados.

2.6.2 Descrição matemática do problema de otimização de número e posição de válvulas de controle

Esta seção faz uma adaptação dos conceitos matemáticos apresentados em Rao (1996) para descrever o problema de otimização de número e posição de válvulas de controle. São apresentadas a descrição geral do problema de otimização, as variáveis de projeto envolvidas, as principais restrições das variáveis de projeto e a função-objetivo. Utiliza-se a nomenclatura e as descrições apresentadas nas seções 2.3 e 2.4.

2.6.2.1 Representação matemática do problema de otimização

O problema de otimização considerado é um problema de maximização de uma função econômica pela determinação da melhor configuração de número e posição de válvulas de controle. O problema pode ser representado da seguinte forma (8):

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar: } f(\hat{u}), & (8) \\ & \text{Sujeito a: } g_j(\hat{u}) \leq 0; \quad j = 1, \dots, m \\ & \hat{u}^l \leq \hat{u} \leq \hat{u}^u \end{aligned}$$

em que:

- \hat{u} é o vetor de projeto que contém as variáveis de projeto;
- $f(\hat{u})$ é a função-objetivo que se deseja maximizar;
- g_j é a j -ésima condição a ser obedecida de um total de m condições de desigualdade;
- \hat{u}^l e \hat{u}^u são as restrições das variáveis de projeto para os limites inferior e superior, respectivamente.

2.6.2.2 Vetor das variáveis de projeto

O vetor das variáveis de projeto é formado pela combinação de variáveis para representar o número, a posição dada pela geometria do poço e o controle das válvulas. O vetor pode ser enunciado como (9):

$$\hat{u} = \{n_v; \hat{v}; \hat{w}\} \quad (9)$$

Observa-se que o número de variáveis de projeto não é fixo e depende do número de válvulas, sendo $n_v = \{b \in N\}$. Este fato ocorre devido ao tamanho dos vetores de posição e de controle que são função de n_v . Além disso, observa-se que, embora o objetivo seja a determinação do número e da posição, é também necessária à determinação das variáveis do controle de cada válvula para alcançar o maior potencial econômico de cada alternativa de número e posição.

2.6.2.3 Condições de restrição do problema

A otimização envolve diferentes condições de desigualdade que restringem o problema. As principais condições são apresentadas a seguir.

- A região controlada por uma ICV i em um poço j deve ser completamente alocada ao longo da trajetória do poço (wl^j) e pode ser expressa como (10):

$$g_1(\hat{u}) = s^{i,j} + d^{i,j} - wl^j \leq 0 \quad (10)$$

- Não pode haver interseção entre regiões controladas por diferentes válvulas. Sendo assim, região controlada por uma ICV i em um poço j não pode coincidir, mesmo que parcialmente, com qualquer outra região controlada por outra válvula. Esta condição pode ser expressa por (11):

$$g_2(\hat{u}) = s^{i,j} + d^{i,j} - s^{i+1,j} \leq 0 \quad (11)$$

- Se o valor de x^k é igual a 0, então o valor de x^{k+1} deve ser igual a 0, condição necessária para operação de válvulas do tipo abre-fecha (12):

$$g_3(\hat{u}) = x^{k+1,i,j} - x^{k,i,j} \leq 0 \quad (12)$$

- O valor de d deve ser igual ou maior que a distância mínima possível entre dois *packers* (d_{\min}) e deve ser igual ou menor do que a máxima distância econômica entre dois *packers*, em relação ao comprimento do poço ($d_{\max} = \alpha \times wl^j$) (13):

$$\begin{aligned} g_4(\hat{u}) &= d_{\min} - d^{i,j} \leq 0 \\ g_5(\hat{u}) &= d^{i,j} - d_{\max} \leq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

- O valor de s deve ser igual ou maior do que 0 e igual ou menor do que a diferença entre wl e d_{\min} (14):

$$\begin{aligned} g_6(\hat{u}) &= -s \leq 0 \\ g_7(\hat{u}) &= s^{i,j} - wl^j + d_{\min} \leq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

- O valor de n_v deve ser maior ou igual a 0 (15):

$$g_8(\hat{u}) = -n_v \leq 0 \quad (15)$$

- O valor de x deve ser igual ou maior que 0 e menor ou igual a 1 (16):

$$g_9(\hat{u}) = -x \leq 0 \quad (16)$$

$$g_{10}(\hat{u}) = x - 1 \leq 0$$

2.6.2.4 Função-objetivo

A função-objetivo é uma função econômica dada por (17):

$$f(n_v, \hat{u}, \hat{w}) = f(F^f(t), \Omega) \quad (17)$$

Em que F^f é uma série temporal de dados do escoamento volumétrico do campo de petróleo, prevista no simulador de reservatórios, e Ω representa um conjunto de parâmetros econômicos que conectam o escoamento do campo com o seu VPL.

2.6.3 Visão geral sobre as abordagens utilizadas na otimização do número e posição de válvulas de controle

Algumas diferentes abordagens são utilizadas na literatura para determinar o uso de poços inteligentes. Estas abordagens têm diferentes características de qualidade da resposta e de esforço computacional necessário para a execução dos algoritmos de otimização. Pode-se dividir essas abordagens em três tipos de avaliação para resolver o problema de número e de posição de válvulas de controle.

1. Avaliação da viabilidade do uso de uma determinada configuração de número e posição de válvulas por meio da otimização das variáveis de controle.
2. Determinação do número e posição de válvulas por meio da otimização das variáveis de controle de diferentes configurações de número e posição de válvulas.
3. Otimização do número e posição de válvulas como variáveis de projeto de métodos de otimização.

O primeiro tipo de avaliação consiste nos trabalhos que otimizam unicamente as variáveis do controle de válvulas localizadas em posições fixas. O objetivo em geral é avaliar se uma determinada configuração de válvulas em poços apresenta viabilidade econômica. A maior parte dos trabalhos publicados na literatura trata deste tipo de avaliação. A configuração estudada em geral é baseada na estrutura geológica do reservatório e na experiência dos engenheiros. A maior deficiência deste tipo de abordagem é a avaliação de uma única estratégia. Porém, pode ser uma alternativa prática quando não for possível fazer avaliações mais complexas. Este primeiro tipo de avaliação pode ser encontrado em Doublet et al. (2009), Alhuthali et al. (2010), Almeida et al. (2010), Dehdari et al. (2011), entre outros.

O segundo tipo de avaliação consiste em avaliar diversas configurações de número e posição de válvulas e determinar qual a configuração que obtém a melhor resposta. Portanto, esta avaliação é feita da mesma forma que o primeiro tipo de avaliação, mas repetidas vezes. Observa-se que é necessário um maior esforço para realizar uma avaliação desta forma, mas pode-se chegar a melhores soluções. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Emerick e Portella (2007).

O terceiro tipo de avaliação tem o objetivo de obter o número e posição das válvulas por meio de um método de otimização que determine diretamente essas variáveis de decisão. Este tipo de abordagem tem sido menos estudado pela comunidade científica. A principal vantagem é determinar de forma mais precisa e confiável a solução ótima do problema. Entretanto, o problema pode se tornar muito complexo para ser solucionado com métodos tradicionais de otimização. Pinto (2013) apresenta um fluxograma de otimização para solucionar o número e posição de válvulas utilizando um método híbrido de algoritmo genético e com base em gradientes, associados ao uso de informação do corte de água dos poços para restringir o problema.

2.6.4 Principais métodos de otimização utilizados na literatura

Alguns trabalhos encontrados na literatura associam a simulação de reservatórios com métodos de otimização tais como os baseados em gradientes (Aitokhuehi e Durlifsky, 2005; Almeida et al., 2010; Yeten et al., 2004; Zandvliet et al., 2007), algoritmos evolucionários (AE) e genéticos (Almeida et al., 2010; Alhuthali et al., 2010; Alghareeb, 2009), utilizando filtros de Kalman (Doublet et al., 2009; Nævdal et al., 2006), busca direta (Emerick e Portella, 2007), *simulated annealing* (Kharghoria, 2002), entre outros, para solucionar problemas envolvendo poços inteli-

gentes. Em geral, adaptações são introduzidas para torná-los mais eficientes, combinando diferentes técnicas de avaliação ou modificando funções e correlações utilizadas na evolução dos métodos. Entretanto, em geral, os métodos utilizados demandam o uso de milhares de simulações, o que pode inviabilizar o seu uso em casos práticos.

Almeida et al. (2010) utilizaram um algoritmo evolucionário para otimizar o controle de válvulas em poços inteligentes. As válvulas utilizadas foram do tipo abre-fecha. Em geral, os testes requereram um número da ordem de dezenas de milhares de simulações para otimizar problemas com pelo menos 30 variáveis. Para certos casos, não foi observada uma convergência na otimização para os testes realizados. Entretanto, o uso de válvulas de controle se mostrou viável. Em geral, métodos do tipo algoritmo genético necessitam de um grande número de simulações para convergir.

Yeten et al. (2004) utilizou o método do gradiente para solucionar o problema de controle de válvulas. Um caso simples com 4 válvulas alocadas ao longo de um poço multilateral foi criado. As válvulas foram otimizadas a cada 185 dias por um período de 8 anos, sendo necessárias 16 otimizações para otimizar o caso completo com um total de 64 variáveis de decisão. As válvulas foram otimizadas considerando a produção de óleo como função-objetivo. O método necessitou de 80 a 100 simulações para cada otimização sendo necessário de 1200 a 1600 simulações para otimizar o caso completo.

Pinto (2013) aplicou um método híbrido de otimização, que utiliza algoritmo genético e um método baseado em gradientes para solucionar o problema de controle de válvulas. Os modelos utilizavam diferentes tipos de controle, que necessitavam de 4 a 56 variáveis de decisão. Os resultados mostram que foi necessário entre 1500 a 10000 simulações para a otimização dos casos mais simples e do mais complexo, respectivamente. Portanto, mesmo o método mais sofisticado que o algoritmo genético puro, necessitou de mais de 1000 simulações para o caso mais simples.

2.6.5 Solução de problemas de larga escala em engenharia

Na literatura, a otimização de problemas de larga escala (*large-scale optimization*, Edgar et al., 2001) em problemas práticos de engenharia é solucionado pelo uso de programação dinâmica e a teoria da decomposição de sistemas em subsistemas, invocando o princípio de Bellman (Zandvliet et al., 2007; Rudd e Watson, 1968) e o princípio da decomposição (Dantzig e Wolf, 1960).

Este tipo de otimização também pode ser denominada de otimização de macrossistemas (Rudd e Watson, 1968), otimização de sistemas complexos (Delaney e Vaccari, 1989), otimização multinível (Rao, 1996). A decomposição do sistema resulta numa hierarquia multiníveis de vários subsistemas que compreendem o sistema completo (Zandvliet et al., 2007; Rudd e Watson, 1968; Rao, 1996).

Estes métodos são utilizados para avaliar problemas com um grande número de variáveis de decisão. Portanto, métodos tradicionais aplicados de forma direta para resolver esses problemas podem ser ineficientes. Nesses casos, métodos alternativos devem ser usados para completar o processo de avaliação no tempo determinado (Filip, 2008). Entretanto, é necessário avaliar a inter-relação entre cada subsistema, como evidenciado na seção 2.2.2.2.

Em geral, os métodos de otimização avaliam importantes características do sistema para decidir quais subsistemas serão criados, qual a relação entre eles e como relacioná-los para alcançar a melhor resposta. Trabalhos como Asadollahi et al. (2012), Alhuthali et al. (2010) e Gharbi (2005) têm aplicado a programação dinâmica para atacar este tipo de problema. Informações da produção de fluidos e da geologia são utilizadas para encontrar a configuração ótima de ICV por meio da delimitação do problema e sua divisão da otimização em partes. Métodos análogos têm sido utilizados também para encontrar alternativas de outras variáveis de decisão da estratégia de produção de petróleo (Iyer e Grossmann, 1998).

A Figura 2-10 apresenta um esquema que representa a otimização de um sistema dividido em 3 partes. O diagrama representa um algoritmo em que os subsistemas são otimizados em sequência, iniciando do Subsistema I e terminando no Subsistema III. Entretanto, pode existir uma inversão na direção de otimização, caso seja constatada a necessidade de reavaliar um subsistema avaliado em uma etapa anterior. Após a otimização dos três subsistemas, considera-se que o sistema completo esteja otimizado.

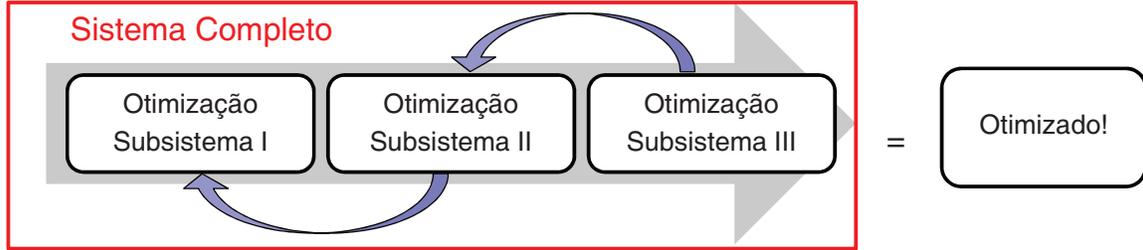


Figura 2-10: Esquema de otimização de subsistemas para alcançar uma resposta otimizada.

2.6.6 Algoritmo evolucionário aplicado ao controle de válvulas

Nesta seção, apresenta-se o algoritmo evolucionário utilizado para execução deste trabalho. O algoritmo é baseado em ferramentas disponíveis no programa MATLAB (MATLAB, 2012).

O tipo de problema de otimização solucionado pelo AE é o de controle para o caso de válvula abre-fecha (18).

$$F(VPL) = \max f(t_{sd}^1, t_{sd}^2, \dots, t_{sd}^{n_v}) \quad (18)$$

Sujeito a

$$a_i \leq t_{sd}^i \leq b_i; \text{ para } i = 1, 2, \dots, n_v$$

em que:

t_{sd} é o tempo de fechamento de uma válvula;

a_i é o limite inferior ao qual a i -ésima válvula pode ser fechada;

b_i é o limite superior ao qual a i -ésima válvula pode ser fechada.

O esquema básico para aplicação do algoritmo evolucionário para a solução do problema é mostrado na Figura 2-11. O processo se inicia com a determinação dos parâmetros de entrada e finaliza quando o algoritmo atinge o número de gerações estipulado.

O único critério de parada de simulação utilizado é o número máximo de gerações. Esta definição é inserida para que o espaço de busca seja exaustivamente avaliado. Além disso, é necessário que o arquivo de simulação seja preparado de forma apropriada para que o algoritmo possa ser executado corretamente.

A primeira geração é criada com indivíduos aleatórios, exceto por um indivíduo criado por meio de uma regra, aqui denominado indivíduo potencial. O indivíduo potencial é criado considerando-se que o fechamento das válvulas ocorre quando o corte de água limite econômico é atingido. Isto garante que as válvulas não operem com fluxo de caixa negativo, gerando assim, um indivíduo com potencial de aumentar o VPL do poço.

O AE opera com notação decimal e os valores para tempo de fechamento são números reais. Os valores são normalizados entre os limites superiores e inferiores da variável de controle. A primeira geração é criada com indivíduos gerados por meio de números aleatórios.

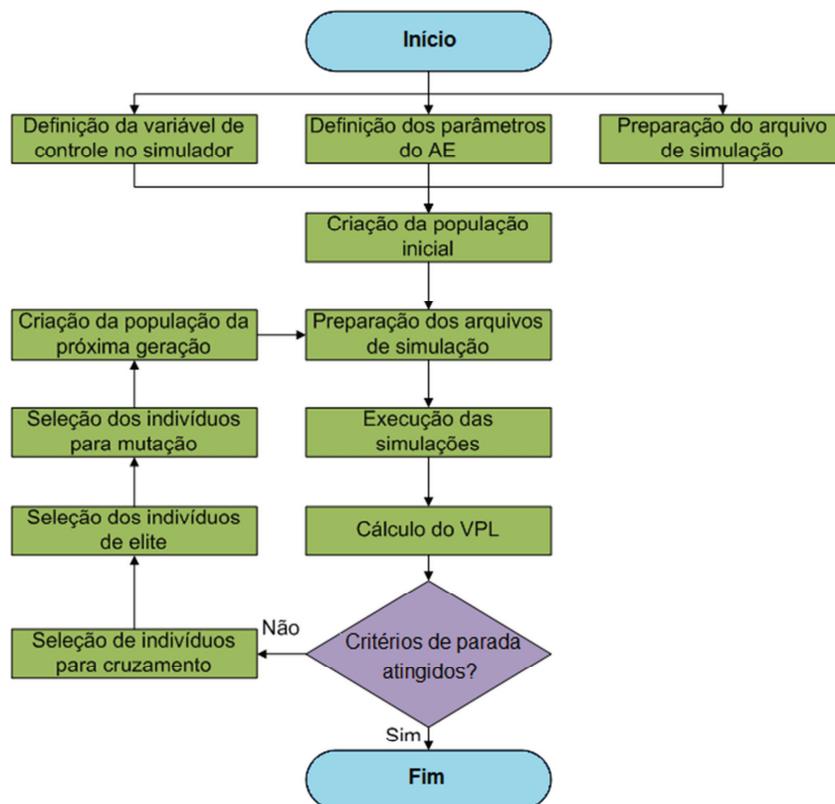


Figura 2-11: Esquema da aplicação de algoritmo evolucionário.

Os operadores básicos utilizados são: elitismo, cruzamento e mutação (Goldberg, 1989). O operador de elite garante que os melhores indivíduos sejam perpetuados na próxima geração criada, sendo necessária a definição da quantidade de indivíduos de elite. O cruzamento é uma opera-

ção que define indivíduos da próxima geração com base em dois indivíduos da geração atual. Os indivíduos da geração atual são escolhidos com base em um sorteio no qual a chance de um indivíduo ser escolhido é proporcional ao VPL correspondente. Quanto maior o VPL do indivíduo, maior a chance de ser escolhido para cruzamento. A equação (19) apresenta o cálculo do valor do indivíduo da geração seguinte, com base na ponderação do valor de indivíduos da geração atual. O indivíduo que tem o maior VPL recebe um peso maior na geração do novo indivíduo.

$$Ind._{criado}^{ger+1} = \frac{Ind._{selecionado}_1^{ger} * 1,2 + Ind._{selecionado}_2^{ger} * 0,8}{2} \quad (19)$$

A mutação cria um indivíduo da próxima geração com base em um número aleatório entre os limites das variáveis. Portanto, os indivíduos que fazem parte da população que sofreu mutação, não tem relação com os indivíduos da geração anterior.

A população da próxima geração é definida pelo conjunto de indivíduos de elite, cruzados e com mutação. A proporção de cada um dos operadores na próxima geração é definida no início do algoritmo, na definição dos parâmetros do AE.

2.6.7 Método da ascendente da maior inclinação

O método adotado é uma variação do método da ascendente da maior inclinação que não considera derivadas (*derivative-free, em inglês*) no cálculo (Zandvliet et al., 2007; Rao, 1996). O método substitui a derivada pela diferença simples do VPL entre dois pontos. Os passos para aplicação do método são definidos a seguir:

1. Partir do ponto inicial $f(x=0, t^k)$, sendo que para representar o controle da válvula $\{x^{1,i,j} \dots x^{k-1,i,j}\} = 1$, para válvula aberta, e $\{x^{k,i,j} \dots x^{k_{max},i,j}\} = 0$, para válvula fechada. Atribuir o contador $z = 1$ para esta iteração.
2. Calcular o VPL do campo para $f(x=0, t^k)$.
3. Determinar a direção de maximização, avaliando $f(x=0, t^{k+1})$ e $f(x=0, t^{k-1})$ em relação à $f(x=0, t^k)$.

4. Seguindo a direção de maximização, testar um novo ponto $f(x=0, t^{k+1+z})$, se a direção de maximização indicar um aumento no valor de k , ou $f(x=0, t^{k-1-z})$, se a direção de maximização indicar uma diminuição no valor de k .
5. Se $f(x=0, t^{k\pm 1}) \geq f(x=0, t^{k\pm(1+z)})$, parar o processo. Caso contrário, atribuir o valor $z = z + 1$ ou $z = z - 1$, dependendo do sentido de maximização, e voltar para o passo 4.

2.7 Uso de métodos determinísticos de otimização na avaliação de sistemas probabilísticos

Devido às características de flexibilidade e confiabilidade operacional, a operação de poços inteligentes pode ser ajustada conforme as mudanças nas condições de produção ou de reservatório e, além disso, a operação está sujeita a incertezas no conhecimento do próprio reservatório. Assim, uma previsão sobre o comportamento da operação futura de poços inteligentes está sujeita a eventos de ordem probabilística, ao desconhecimento sobre o sistema, a alterações de estratégia ao longo da produção e falhas operacionais. Estas características sugerem o uso de sistemas probabilísticos para a sua análise. Portanto, uma avaliação mais criteriosa da viabilidade de aplicação de poços inteligentes deve ser realizada a partir de uma análise de risco e não por meio de avaliações puramente determinísticas.

Entretanto, devido às dificuldades da avaliação de risco por meio de simulação numérica, que pode ser muito dispendiosa, técnicas de amostragem e de árvore de decisão são utilizadas para avaliar estratégias considerando incertezas. Essas técnicas utilizam-se de otimização determinística para avaliar uma estratégia ou um controle em condições específicas. Portanto, métodos confiáveis e eficientes de otimização determinística são fundamentais para uma avaliação de risco e de viabilidade do uso de poços inteligentes.

2.7.1 Avaliação probabilística por meio de amostragem

Um sistema probabilístico pode ser definido como um sistema que envolve certo grau de incerteza na previsão do seu comportamento, requer o uso de variáveis aleatórias para descrever

certos elementos do sistema (Kirchsteiger, 1999) e apresenta um determinado risco associado ao prognóstico do seu comportamento. Existem diferentes formas de avaliação de um sistema probabilístico. Entre eles, tem se destacado na engenharia de petróleo e em outras áreas do conhecimento que usam simulação computacional o uso de quantificação de incertezas por meio de projeto de experimentos (*design of experience*), chamado também de experimentos computacionais (*computer experiment design*), para avaliar problemas de otimização de projetos (Koehler e Owen, 1996).

Projeto de experimentos é uma metodologia que faz parte da estatística que estuda o planejamento, execução, coleta de dados, análise e interpretação de resultados. O projeto de experimentos é utilizado para dar apoio probabilístico, permitindo fazer inferência sobre o comportamento de diferentes fenômenos da natureza, com grau de incerteza conhecido (Kirchsteiger, 1999).

Na área de engenharia de reservatórios, tem-se utilizado técnicas clássicas de amostragem por meio de métodos como Monte Carlo (Lin et al., 2012) e amostragem por Hipercubo Latino (Goda e Sato, 2014; Maschio et al. 2010) para seleção de modelos geológicos. Além desses métodos, outros métodos como o uso de seleção de modelos representativos têm sido utilizados. Costa et al. (2008) mostra uma metodologia de amostragem para reduzir o número de modelos geológicos necessários para se avaliar o risco de uma estratégia. Em todos esses casos, os modelos geológicos selecionados são tratados separadamente de para gerar cenários determinísticos dentro de um contexto probabilístico.

2.7.2 Avaliação de confiabilidade por meio de árvores de falha

A confiabilidade é uma característica de um equipamento, expressa pela probabilidade associada à capacidade que o equipamento possui de manter o seu funcionamento em circunstâncias normais, considerando um conjunto de condições por um dado período de tempo (Birolini, 2004). Devido às condições de instalações de válvulas em poços, no interior de poços a dezenas ou milhares de metros da superfície, a confiabilidade é uma importante característica a ser considerada na análise da viabilidade de uso de poços inteligentes. Neste contexto, alguns trabalhos têm utilizado técnicas de árvores de falha para avaliar a confiabilidade em poços inteligentes.

Árvores de falha são ferramentas de modelagem utilizadas para avaliar a confiabilidade de equipamentos (Bedford e Cooke, 2006). Basicamente, uma árvore de falha avalia situações de forma discretizada, em que probabilidades são associadas às falhas ou às situações de comportamento normal (sem falhas). A Figura 2-12 mostra um exemplo simplificado de árvore de falha. Neste exemplo, um equipamento é avaliado por meio dos efeitos que determinadas falhas causam na operação deste equipamento. A árvore é constituída de ramos nos quais uma situação é avaliada de forma determinística.

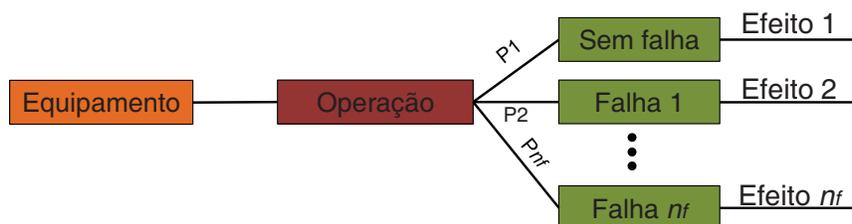


Figura 2-12: Exemplo de árvore de falhas para avaliar um determinado equipamento.

Alguns trabalhos têm apresentado estudos de confiabilidade na operação de poços inteligentes por meio do uso de árvores de falha. Almeida et al. (2010) e Yeten et al. (2004) utilizaram o método de Monte Carlo para gerar cenários com falhas na operação de poços inteligentes com base em uma distribuição Weibull. Para cada cenário a operação das válvulas foi otimizada. Em ambos os trabalhos a avaliação mostrou que as válvulas podem ser viáveis mesmo em condições de incerteza quanto à confiabilidade.

2.7.3 Exemplificação do uso de métodos de determinísticos na avaliação probabilística

Para exemplificar o contexto da análise probabilística, 3 aspectos importantes da avaliação de poços inteligentes são discutidos: o desconhecimento do reservatório, a capacidade de adaptação dos poços inteligentes (flexibilidade) e a confiabilidade na operação. O objetivo é mostrar como uma avaliação mais complexa se utiliza de métodos de otimização determinística na tomada de decisão. Apresenta-se uma descrição geral de um exemplo de árvore de decisão com aplicação de métodos determinísticos para avaliação probabilística utilizando técnicas de amostragem e de árvore de derivação para modelar as incertezas.

A Figura 2-13 mostra um exemplo para avaliação probabilística de estratégias considerando incertezas no conhecimento do reservatório, a flexibilidade introduzida pelo controle ao longo da produção e a confiabilidade na operação das válvulas. Considera-se que a “Estratégia” é uma alternativa que inclui a aplicação de poços inteligentes, que as incertezas podem ser representadas por um conjunto de amostras do “Modelo” de reservatórios, que os poços podem ser operados de diferentes formas por meio de “Controles” e que um “Controle” está sujeito a determinadas “Falhas” operacionais.

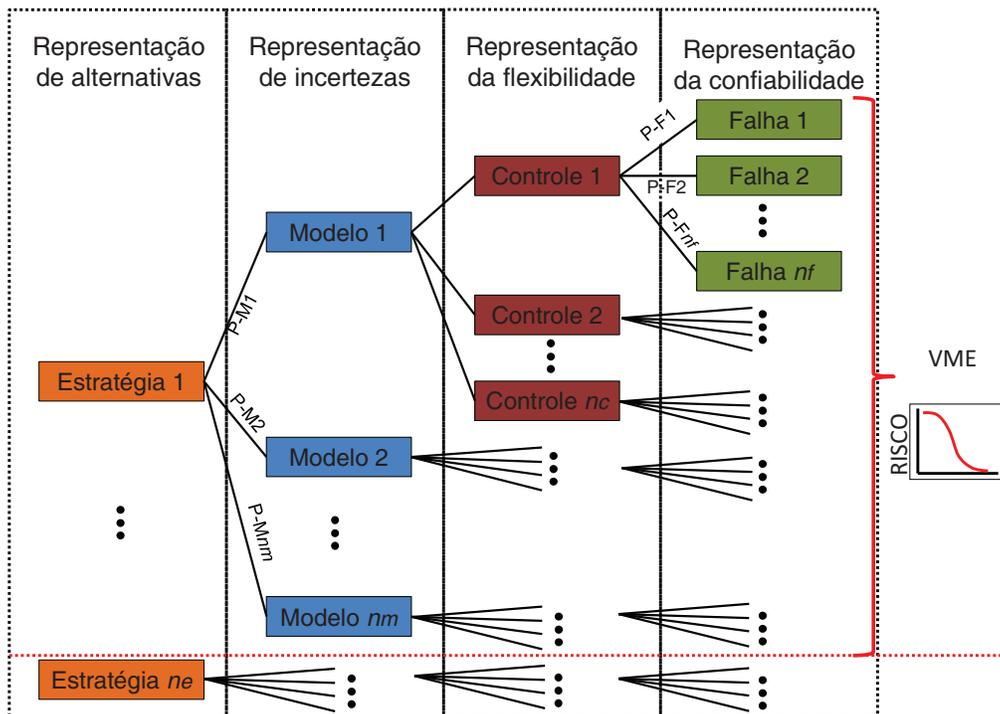


Figura 2-13: Esquema para avaliação de incertezas, flexibilidade e confiabilidade por meio de métodos determinísticos.

As “Estratégias” e os “Controles” fazem parte das decisões que se deseja tomar no presente e possíveis alternativas para o futuro, enquanto que os “Modelos” e as “Falhas” são um meio para representar o conhecimento, ou desconhecimento, sobre determinado aspecto. Os “Modelos” e “Falhas” estão sujeitos à inferência estatística (P), enquanto que a “Estratégia” e o “Controle” estão sujeitos às ações do decisor. Sendo assim, uma avaliação adequada deve incluir a escolha da melhor estratégia utilizando os melhores controles em um ambiente com incertezas e falhas operacionais.

A partir da árvore de decisão montada na Figura 2-13 é possível estimar um valor, como o VME, ou construir uma curva de risco para cada estratégia. A árvore tem a finalidade exclusiva de avaliar a estratégia e não o controle que será aplicado. Cada ramo da árvore é composto por uma estratégia, um modelo, um controle e um tipo de falha. Dessa forma, uma análise determinística é necessária para estimar o valor da estratégia em cada ramo. A análise determinística de cada estratégia depende de uma otimização das variáveis do controle para evitar polarização ou parcialidade na seleção da melhor estratégia Costa (1972).

Observa-se que para casos em que existem muitos modelos e possibilidades de controle, a otimização das variáveis de controle é um processo que se repete diversas vezes dentro da árvore de decisão. Além disso, quanto maior o número de alternativas que se deseja avaliar, maior é o esforço para obter uma melhor estratégia. Estes fatos corroboram o desenvolvimento da metodologia apresentada neste trabalho, que pretende reduzir o número de alternativas a serem testadas e otimizar de forma determinística a operação das válvulas.

2.7.4 Justificativa para o desenvolvimento de métodos de otimização determinística

Métodos determinísticos são amplamente utilizados para a análise de sistemas probabilísticos, principalmente em casos em que métodos probabilísticos são difíceis de serem aplicados. Além disso, a avaliação probabilística demanda um elevado custo computacional, devido às repetidas otimizações que são necessárias para se estimar o valor ou o risco de aplicação de uma estratégia. Portanto, justifica-se o desenvolvimento de um método de otimização determinística para a seleção de poços inteligentes.

2.8 Representação do acionamento de válvulas de controle nos simuladores IMEX e ECLIPSE

Neste trabalho, o fechamento de uma válvula é realizado de duas formas, uma forma indireta por meio da alteração do limite do corte de água para fechamento de válvulas (ECLIPSE) e de forma direta por meio de um comando de fechamento aplicado no tempo desejado (CMG). Estas duas formas foram usadas devido à disponibilidade de ferramentas de otimização para dois simuladores comerciais diferentes.

Para o simulador ECLIPSE, utiliza-se o uso do valor do corte de água para fechar a válvula durante o tempo de vida útil do poço. Portanto, o fechamento de cada válvula vai depender do valor do corte de água limite estipulado para o fechamento de cada completação. Por meio do uso do comando COMPLUMP, blocos de simulação são combinados para que eles funcionem como uma unidade controlada por uma válvula de controle. A Figura 2-14 mostra um esquema de blocos de simulação combinados para representar a região controlada por uma ICV. Por meio do comando CECON, estipula-se o valor do corte de água limite de operação para as completações determinadas no comando COMPLUMP.

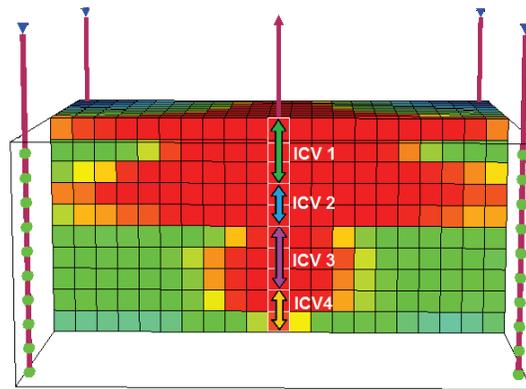


Figura 2-14: Ilustração para a representação de regiões do campo controladas por válvulas de controle (Pinto, 2013).

A Tabela 2-2 apresenta um exemplo do uso dos comandos COMPLUMP e CECON. Neste exemplo os blocos 3, 4 e 5 (na direção x) são combinados para formar uma completação, assim como os blocos 6, 7 e 8 (na direção x). Para o comando CECON, cada bloco recebe um valor de corte de água limite, 0.0500 e 0.7924, e quando o escoamento de um bloco for interrompido, o escoamento em todos os blocos que fazem parte da mesma combinação também é interrompido. Mais detalhes do uso do corte de água para fechamento de poços e completações podem ser consultados em Barreto et al. (2012).

Para o fechamento de válvulas no simulador IMEX, utiliza-se o comando PERF diretamente no tempo de simulação que se deseja fechar uma válvula de controle. Altera-se o campo “OPEN” para “CLOSED”, no bloco de simulação que se deseja fechar. A Tabela 2-3 mostra um exemplo de fechamento de válvula realizado no simulador IMEX. Supondo que os blocos de si-

mulação 1 e 2 (na direção z) fazem parte de uma região controlada por uma válvula e que os blocos de simulação 3 e 4 (na direção z) fazem parte da região controlada por outra válvula, as duas válvulas estão abertas na data 1/1/2017/, sendo que a válvula que controla os blocos de simulação 1 e 2 está fechada a partir da data 1/1/2022.

Tabela 2-2: Exemplo de aplicação dos comandos COMPLUMP e CECON para fechamento de válvulas no simulador ECLIPSE.

```

COMPLUMP
'P-01' 3 43 1 1 1
'P-01' 4 43 1 1 1
'P-01' 5 43 1 1 1
'P-01' 6 43 1 1 2
'P-01' 7 43 1 1 2
'P-01' 8 43 1 1 2
/
CECON
'P-01' 3 29 1 1 0.500000 /
'P-01' 4 29 1 1 0.500000 /
'P-01' 5 29 1 1 0.500000 /
'P-01' 6 29 1 1 0.792400 /
'P-01' 7 29 1 1 0.792400 /
'P-01' 8 29 1 1 0.792400 /
/

```

Tabela 2-3: Exemplo de fechamento de válvula por meio de alteração no comando PERF no simulador IMEX.

Válvulas abertas	1 Válvula fechada
*DATE 2017 1 1	*DATE 2022 1 1
PERF GEOA 'Prod-1'	PERF GEOA 'Prod-1'
8 76 1 1. OPEN	8 76 1 1. CLOSED
8 76 2 1. OPEN	8 76 2 1. CLOSED
8 76 3 1. OPEN	8 76 3 1. OPEN
8 76 4 1. OPEN	8 76 4 1. OPEN

3. METODOLOGIA

A metodologia geral contém todos os passos necessários para atingir o objetivo de desenvolver um método de otimização proposto e verificar a sua aplicação e é dividida em 4 metodologias interligadas:

- metodologia de trabalho: procedimento científico utilizado para a construção e verificação da metodologia de otimização proposta; é a metodologia que organiza todo o trabalho para o desenvolvimento da metodologia proposta;
- metodologia de otimização proposta: a formulação de um algoritmo de otimização para a solução do número e da localização de válvulas de controle;
- metodologia de validação: utilizada para validar a eficiência do algoritmo de otimização, comparando-se os resultados obtidos com outro método de otimização;
- metodologia de aplicação: utilizada para verificar a eficácia do método de otimização proposto na solução de casos complexos.

3.1 Metodologia de trabalho

Para o desenvolvimento do método de otimização é necessário que algumas etapas sejam cumpridas para elaborá-lo e validá-lo para a aplicação prática. A metodologia de trabalho é dividida em 4 etapas:

1. desenvolvimento do método de otimização;
2. desenvolvimento das rotinas computacionais;
3. validação do método de otimização;
4. aplicação do método em casos mais complexos.

A primeira etapa corresponde à aplicação dos conceitos envolvidos no método e elaboração do algoritmo. A metodologia proposta utiliza conceitos do método de otimização por partes por

meio do uso de programação dinâmica. Também utiliza conceitos sobre a avaliação de informações do reservatório e de indicadores de desempenho. O conjunto desses conceitos é usado para a elaboração do algoritmo, que representa de forma lógica as etapas do método de otimização.

A segunda etapa é a programação computacional do método. A automatização do método é necessária devido ao alto fluxo de informações que envolvem a simulação de reservatórios, a geração e a avaliação dos indicadores e a otimização do controle das válvulas. A avaliação realizada de forma manual inviabilizaria o desenvolvimento da metodologia.

A validação é a etapa em que os resultados obtidos pela metodologia proposta são comparados com os resultados obtidos por um algoritmo evolucionário (AE). O AE é programado para avaliar milhares de opções e possibilitar a avaliação do espaço de solução exaustivamente, maximizando a probabilidade de que o ótimo global seja atingido. Portanto, a metodologia proposta é validada caso atinja resultados semelhantes ou muito próximos ao máximo global.

A aplicação é realizada para testar o método de otimização proposto em casos mais complexos. Devido ao custo computacional de se executar uma validação em todos os casos analisados, optou-se por validar a metodologia em apenas um caso e aplicá-la para verificar a sua eficiência para os outros, sem comparar as soluções do método proposto com o AE. A verificação é feita através de uma avaliação do desempenho do método aplicando-o a casos com diferentes características e comparando seus resultados com os resultados médios encontrados na literatura.

Portanto, as 4 etapas apresentadas são propostas para desenvolvimento do método de otimização e validação para uso em casos práticos que demandam alto tempo de simulação.

3.2 Metodologia de otimização dinâmica por partes (MOD-P)

3.2.1 Descrição geral

A metodologia proposta é baseada no método de otimização por partes. Ela utiliza indicadores econômicos para definir a hierarquia do processo de otimização. O objetivo é reduzir a complexidade do problema, selecionando alternativas com maior potencial para serem avaliadas prioritariamente e descartar alternativas que apresentam pouco ou nenhum potencial. Com isso,

pretende-se desenvolver um método capaz de viabilizar avaliações em casos com simulações demoradas, proporcionando uma avaliação confiável.

A Figura 3-1 mostra de forma esquemática a ideia de divisão do problema em problemas menores e a otimização de cada problema. O sistema é dividido de tal forma que apenas um conjunto de variáveis de decisão de uma válvula de controle é tratado como variável independente. Apesar de as válvulas de controle estarem presentes nos subsistemas posteriores, elas são tratadas como parâmetros do sistema e não como variáveis de decisão. Em cada subsistema, são encontrados a posição dos *packers* e a configuração da operação futura para a válvula que está sendo considerada como variável independente. O processo evolui até que o número otimizado de válvulas e suas posições sejam encontrados.

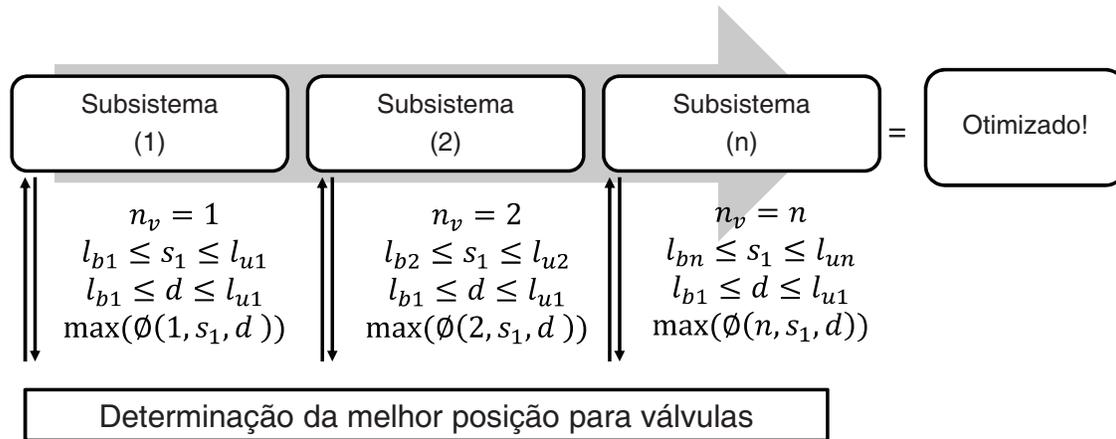


Figura 3-1: Esquema de divisão do problema de otimizar número e posição de válvulas em problemas menores.

O MOD-P combina um algoritmo para avaliação, seleção e ordenamento de alternativas de posicionamento de válvulas de controle e um algoritmo para a otimização do controle da alternativa selecionada. O objetivo da otimização é maximizar uma função-objetivo (no caso deste trabalho o VPL do projeto), que representa o indicador econômico escolhido para comparar alternativas. Portanto, o algoritmo analisa apenas uma alternativa de posicionamento de válvula de controle a cada ciclo do algoritmo de otimização e otimiza o controle para atingir o máximo VPL.

A Figura 3-2 mostra de forma esquemática o algoritmo de otimização por partes, proposto neste trabalho. As caixas em verde indicam a execução de procedimentos computacionais para

simulação, leitura de dados e sua organização. As caixas da cor rosa explicitam as alterações nas variáveis do problema. A cor roxa indica as decisões dentro do algoritmo. A cor azul indica os pontos de início e fim do processo.

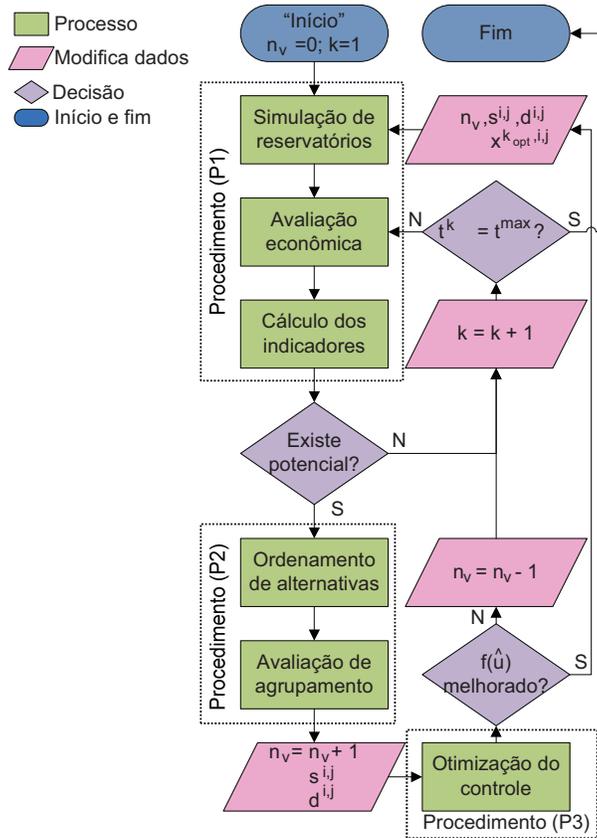


Figura 3-2: Algoritmo de otimização por partes do número e posicionamento de válvulas de controle.

O MOD-P é composto por 3 procedimentos. O primeiro procedimento, P1, visa a obtenção de indicadores do campo para um determinado tempo. O segundo procedimento, P2, visa a identificação da alternativa com maior potencial. O terceiro procedimento, P3, é a otimização do controle para a alternativa selecionada com a posição da válvula. Os procedimentos são conectados por incrementos no tempo avaliado (t^k), mudança de variáveis de projeto (n, s, d, x) e avaliações sobre as informações geradas em cada procedimento.

Para melhor explicar o algoritmo, divide-se o algoritmo em dois ciclos: o ciclo interno (CI) e o ciclo externo (CE). O ciclo interno é formado pelo procedimento P1 e suas conexões. O ciclo

externo engloba todo o algoritmo, incluindo o ciclo interno. Pretende-se, com essa divisão, diferenciar o incremento no tempo analisado.

O algoritmo inicia considerando o sistema sem válvulas de controle e no tempo em que o campo começa a produção. O algoritmo entra no CI para a avaliação dos indicadores no tempo t^1 . Então, inicia-se P1. Caso seja observado algum potencial de aplicação das válvulas neste tempo, o algoritmo sai do CI e entra no P2. Caso não exista potencial, incrementa-se o tempo de análise monotonamente até que seja encontrado o tempo em que exista potencial de avaliação ou até que o tempo atinja o limite máximo, t^{\max} .

Ao sair do CI, o algoritmo inicia o procedimento P2. Este procedimento é utilizado para avaliar as alternativas viáveis, selecionadas no procedimento anterior, e definir qual é a alternativa com maior potencial de aplicação e que será avaliada nesta volta do CE. São utilizados processos para ordenar as alternativas por potencial de aplicação e para avaliar a possibilidade de agrupar regiões vizinhas. Apenas uma alternativa é selecionada para delimitar a região de controle de cada válvula. Após esses processos, define-se a posição de instalação da válvula que será avaliada de forma isolada e a variável de projeto n_v é incrementada. O algoritmo segue para P3.

O P3 tem a finalidade de avaliar a configuração ótima do controle para a válvula selecionada. Este procedimento é realizado por um método de otimização adequado ao modelo do sistema de controle definido para a válvula. Para o caso analisado neste trabalho, o método utilizado é o Método da Ascendente da Maior Inclinação apresentado na seção 2.6.7.

O próximo passo é a avaliação da resposta da otimização do controle da válvula. A resposta da otimização indica se a aplicação da configuração ótima do controle tornou viável a implantação da válvula de controle. Caso a implantação seja viável, o método prossegue considerando a válvula na posição indicada no P2. Caso não seja identificada a viabilidade de implantação, o algoritmo volta para o CI, inicia a avaliação no tempo t^{k+1} e volta ao número de válvulas utilizado no CI anterior.

Também é identificado o tempo em que houve a primeira ação na válvula otimizada. Este tempo será usado para iniciar a nova avaliação no CI. Isto é feito para garantir que as mudanças provocadas pelo acionamento da válvula no escoamento do próprio poço e do restante do campo

sejam avaliadas no novo ciclo. Por exemplo, considerando que foi identificada a potencialidade de aplicação da válvula pelo procedimento P1 no tempo $t^{k=5}$, mas a configuração ótima do controle da válvula identificou que válvula deve ter o primeiro acionamento no tempo $t^{k=4}$, o próximo ciclo iniciará a avaliação novamente no tempo $t^{k=5}$, pois a partir desta data o comportamento do reservatório foi alterado.

A otimização termina quando o tempo máximo de projeto é alcançado, t^{\max} . Porém, devido à complexidade da identificação da viabilidade das válvulas e ao fato que diferentes indicadores podem levar a diferentes respostas, o algoritmo pode ser novamente executado em um novo estágio. Cada estágio é composto por diferentes formas de identificar o potencial de aplicação das válvulas. Portanto, em cada estágio existe uma maneira de estimar os indicadores no procedimento P1 e ordenar e selecionar as variáveis testadas no procedimento P2.

O primeiro estágio sempre deve iniciar com as variáveis $n_v = 0$ e $k = 1$. Os estágios subsequentes iniciam com a resposta otimizada para o número de válvulas encontrada no estágio anterior. Por exemplo, se no estágio ES1 o número otimizado de válvulas é $n_v = 2$, o estágio ES2 será iniciado com as duas válvulas encontradas no estágio anterior e no tempo $t^{k=1}$.

3.2.2 Procedimento P1 - Avaliação de indicadores em um tempo específico t^k

O procedimento P1 é realizado para avaliar todas as regiões de monitoramento definidas no modelo discretizado dos poços. As etapas necessárias para esta avaliação são:

1. discretização adequada do modelo de reservatórios para avaliação de poços;
2. criação de regras quantitativas para a definição do uso de válvulas;
3. simulação de reservatórios;
4. geração de dados econômicos;
5. cálculo dos indicadores.

As Etapas 1 e 2 devem ser definidas antes de iniciar o processo de otimização. Elas definem o sistema avaliado e os parâmetros de entrada utilizados em P1. Neste trabalho, o modelo discreto de reservatórios não muda ao longo do algoritmo de otimização e as regras são as mes-

mas durante cada estágio do algoritmo. A simulação de reservatórios só é necessária quando a estratégia de produção é alterada e as condições do reservatório mudam. Portanto, nesta etapa, as simulações de reservatórios só são executadas quando uma válvula for inserida no processo de forma viável. As Etapas 4 e 5 são realizadas em todas as passagens pelo ciclo CI.

O sistema geométrico discretizado para avaliação dos poços em reservatórios consiste em um sistema no qual os poços são discretizados ao longo do seu comprimento para gerar um número n_r^j de regiões de monitoramento do poço. Portanto, uma região de monitoramento do poço (RMP) compreende uma região no espaço contida na trajetória do poço. O objetivo do uso das RMP é ter uma avaliação do escoamento por região do poço.

O conjunto de RMP em um poço j é representado por $RMP^{r,j} = f(s,d)$, sendo, $j = \{b \in N^* | b \leq n_w\}$ e $r = \{c \in N^* | c \leq n_r^j\}$. Portanto, a matriz RMP (20) pode ser descrita para representar as regiões de monitoramento e a matriz $q_{o,w,g}$ (21) representa o escoamento que cada região contribui para o escoamento dos poços produtores. A partir da matriz $q_{o,w,g}$ (21) e de um modelo econômico (Ω) pode-se gerar os dados econômicos para cada região e compor a matriz E (22).

$$RMP = \begin{pmatrix} RMP^{1,1} & RMP^{1,2} & \dots & RMP^{1,n_w} \\ RMP^{2,1} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ RMP^{3,1} & \dots & \dots & RMP^{n_r^j, n_w} \end{pmatrix}. \quad (20)$$

$$q_{o,w,g} = \begin{pmatrix} q_{o,w,g}^{1,1,k} & q_{o,w,g}^{1,2,k} & \dots & q_{o,w,g}^{1,n_w,k} \\ q_{o,w,g}^{2,1,k} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ q_{o,w,g}^{3,1,k} & \dots & \dots & q_{o,w,g}^{n_r^j, n_w,k} \end{pmatrix}. \quad (21)$$

$$E = \begin{pmatrix} f(q_{o,w,g}^{1,1,k}, \Omega) & f(q_{o,w,g}^{1,2,k}, \Omega) & \dots & f(q_{o,w,g}^{1,n_w,k}, \Omega) \\ f(q_{o,w,g}^{2,1,k}, \Omega) & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ f(q_{o,w,g}^{3,1,k}, \Omega) & \dots & \dots & f(q_{o,w,g}^{n_r^j, n_w,k}, \Omega) \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Como as avaliações são feitas com o uso do simulador, as regiões devem ser definidas de forma compatível com elementos (blocos) da malha de simulação, assumindo que a malha está adequadamente dimensionada para fazer a avaliação. A malha deve ser grossa o suficiente para evitar um tempo de simulação excessivo e fina o suficiente para obter os resultados de forma confiável.

A potencialidade para aplicação de válvulas para controle de uma determinada RMP é quantificada por meio do uso de regras. No procedimento P1, as regras são chamadas de eliminatórias e são construídas para eliminar regiões nas quais não se observa potencialidade de aplicação das válvulas. Por exemplo, pode-se definir a seguinte regra: “se uma região não produz água no tempo considerado, ela não tem potencial para aplicação de válvulas neste tempo”, ou ainda “se o campo não apresenta uma determinada queda no fluxo de caixa em determinado período, não existe potencialidade para aplicação de válvulas neste período”. Uma avaliação da potencialidade da válvula é constituída de um conjunto de regras que levam em conta dados de monitoramento do campo, do poço e das regiões, que são usados para formar os indicadores.

Para a geração dos indicadores são utilizados dados técnicos e econômicos do campo, poço e região dos poços. A principal proposta para o uso dos indicadores de desempenho é quantificar o impacto da produção e o custo de fluidos indesejáveis no fluxo de caixa do campo no tempo t^k . Os indicadores são gerados para cada região de monitoramento, construindo uma matriz de dados $I_{ind}^{r,j,k}$ para o tipo de indicador de desempenho ind , sendo que $ind = \{d \in N^* \mid ind \leq n_{ind}\}$ (23). Os indicadores de campo geram uma matriz com todas as entradas iguais e os indicadores de poço geram uma matriz com linhas semelhantes. Apenas os indicadores de região geram uma matriz que pode ter todos os valores diferentes.

$$I_{ind} = \begin{pmatrix} I_{ind}^{1,1,k} & I_{ind}^{1,2,k} & \dots & I_{ind}^{1,n_w,k} \\ I_{ind}^{2,1,k} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ I_{ind}^{3,1,k} & \dots & \dots & I_{ind}^{n_r^j, n_w, k} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Este trabalho apenas utiliza os indicadores de desempenho. Entretanto, não é objetivo do trabalho estudar quais os melhores indicadores para cada tipo de reservatório. Porém, os indicadores utilizados (Tabela 3-1) mostraram-se eficientes no auxílio à otimização.

Tabela 3-1: Indicadores de desempenho eliminatórios, regras e critérios usados para avaliar o potencial de aplicação de válvulas de controle.

Indicador	Descrição do critério e da regra
I_1 – Razão entre o investimento necessário para instalar uma válvula e o VPL do campo sem válvulas. $Investimento_{ICV} / VPL_{field}$	C_1 – Valor que indica se o VPL do campo, antes da instalação de válvulas, tem potencial para pagar o custo de uma válvula. Regra: se o valor de $I_1 \geq C_1$, então não existe potencial para aplicação de válvulas.
I_2 – Variação proporcional do fluxo de caixa líquido (CFL) ao longo do tempo. $(CFL^k - CFL^{k-1}) / CFL^{k-1}$	C_2 – Valor negativo que indica se o fluxo de caixa líquido do campo, poço ou RMP decresce significativamente ao longo do tempo. Regra: se $I_2 \geq C_2$, não existe potencialidade para aplicação de válvulas neste período.
I_3 – Variação proporcional do valor de corte de água (WCT) ao longo do tempo. $(WCT^k - WCT^{k-1}) / WCT^{k-1}$	C_3 – Valor que indica se o corte de água do campo, poço ou RMP cresce significativamente ao longo do tempo. Regra: se $I_3 \leq C_3$, não existe potencial para aplicação de válvulas neste período.
I_4 – Erro médio quadrático do vetor de valores de corte de água em todas as RMP de um mesmo poço em relação à média do corte de água no mesmo poço. $(\sum_{r=1}^{n_r^j} (WCT^{r,k} - \overline{WCT^k}))^2 / n_r^j$	C_4 – Valor que indica se existe uma distribuição equilibrada do corte de água ao longo do comprimento de um poço. Regra: se $I_4 \leq C_4$, não existe potencial para aplicação das válvulas.

3.2.3 Procedimento P2 – ordenamento das regiões com potencial e definição das variáveis de projeto usadas no ciclo.

O procedimento P2 tem o objetivo de avaliar as regiões que mostram potencial, ordená-las em função da potencialidade e definir as variáveis de projeto (s e d) que serão testadas no procedimento P3. Dois tipos de indicadores são usados para atingir os objetivos: indicadores classificatórios e indicadores de projeto. A entrada do processo é a saída do CI, relacionando todas as RMP que tem potencial para avaliação.

Os indicadores classificatórios ordenam as regiões por meio da quantificação do potencial de aplicação da válvula. Considerando as regiões que tem a indicação de viabilidade de avaliação, o objetivo é ordená-las de forma a selecionar a que tiver maior potencial de aplicação. Os indicadores utilizados neste trabalho são I_6 , I_2 e I_7 , utilizados exclusivamente para a classificação nos estágios ES1, ES2 e ES3, respectivamente.

Os indicadores de projeto são utilizados para determinar o comprimento da região de controle da válvula por agrupamento de regiões vizinhas. Após a identificação da zona de maior potencial, por meio do uso dos indicadores de projeto, é realizada uma análise para avaliar a possibilidade de agregar regiões vizinhas para formar um grupo de RMP que será controlado por uma válvula.

Como exemplo, suponha que a $RMP^{3,2}$ foi avaliada sendo a região com maior potencial para aplicação das válvulas. Os indicadores de projeto auxiliam a identificar se as regiões vizinhas $RMP^{2,2}$ e $RMP^{4,2}$ têm potencial para serem agregadas à $RMP^{3,2}$ e formarem uma região de controle maior. Caso exista potencial para agregação, as regiões subsequentes também são avaliadas (no exemplo, $RMP^{1,2}$ e $RMP^{5,2}$). A Tabela 3-2 apresenta os indicadores classificatórios e de projeto utilizados neste trabalho.

3.2.4 Procedimento P3 – otimização do controle da região selecionada pelo uso de válvulas inteligentes

O procedimento P3 é a otimização do controle de projeto. O objetivo é avaliar o uso de uma válvula de controle para operar a região selecionada no procedimento P2. Portanto, o controle da válvula é otimizado, considerando o cenário geológico e econômico do sistema, pois, é necessário que a válvula tenha um controle otimizado para maximizar os ganhos.

Tabela 3-2: Indicadores de desempenho classificatório e de projeto usados para avaliar o potencial de aplicação de válvulas de controle.

Indicador	Descrição, regra e critério
I_6 – Indicador classificatório - Razão entre o FCL da região e o custo de produção dos fluidos indesejados nas regiões (C_u). FCL^k / C_u^k	Valor que quantifica a relevância do custo da produção de fluidos indesejados em relação ao fluxo de caixa líquido gerado. Regra: Quanto maior a relevância do custo da produção de fluidos indesejados, maior o potencial de aplicação de válvulas; os valores são ordenados em ordem descendente.
I_7 – Indicador classificatório – FCL negativo.	Valores de FCL negativos são usados para classificar a potencialidade de aplicação de válvulas. Regra: Quanto menor o valor do FCL negativo, maior é o potencial para aplicação de válvulas de controle. Os valores são ordenados de forma ascendente.
I_5 – Indicador de projeto - Diferença entre o corte de água entre a RMP com maior potencial de aplicação e o corte de água das completagens vizinhas.	C_5 – Valor que indica a proximidade entre os valores do corte de água em duas regiões diferentes. Valores próximos indicam que as regiões podem ser agregadas para formar uma região de controle por válvula maior. Regra: se $I_5 \leq C_5$, a RMP deve ser agregada à região de maior potencial modificando os valores de s e d .

A otimização do controle depende do tipo de válvula e do tipo de informação disponibilizada. Diferentes válvulas requerem diferentes métodos de otimização do controle. Entretanto, neste trabalho apresenta-se o caso com a válvula tipo abre-fecha, com a qual é possível apenas fechar a válvula em determinado tempo. Portanto, os métodos desenvolvidos para o controle da válvula são referentes ao tipo de operação que está válvula possibilita.

Para o controle da válvula abre-fecha utilizada neste trabalho, o controle pode ser completamente definido pela determinação do tempo de fechamento ótimo da válvula. Portanto, tem-se apenas uma variável de controle nesta otimização, o tempo de fechamento da válvula, t_{fecha} , e o espaço de busca do tempo discretizado, t^k , sendo que $k = \{b \in N^* \mid b \leq n_t\}$. A semente para inicializar o método é o tempo t^k em que a potencialidade da válvula foi avaliada. O método adotado é o método da ascendente da maior inclinação apresentado na seção 2.6.7.

3.3 Desenvolvimento das rotinas computacionais

O desenvolvimento das rotinas computacionais visa o melhor desempenho na aplicação do método MOD-P. A economia de tempo por meio da automatização do processo é a principal vantagem, possibilitando a aplicação da metodologia a uma maior quantidade de casos. A construção das rotinas também objetiva evitar erros de procedimentos manuais. As rotinas são indispensáveis para a aplicação a casos que demandem uma avaliação mais eficiente e rápida do uso de válvulas de controle. Portanto, a descrição das rotinas é importante para o entendimento do processo prático de aplicação da metodologia.

Basicamente, parte das rotinas computacionais automatizam os procedimentos P1, P2 e P3, necessários para a execução do algoritmo. Existe uma rotina geral que executa as conexões entre esses procedimentos, as entradas e as saídas do algoritmo. As rotinas podem ser divididas em:

1. R1 – controle do método de otimização;
2. R2 – procedimento P1;
3. R3 – procedimento P2;
4. R4 – procedimento P3;
5. R5 – integração com o simulador de reservatórios;
6. R6 – avaliação econômica;
7. R7 – leitura de dados do modelo simulado;
8. R8 – geração dos indicadores;
9. R9 – ordenamento de regiões;
10. R10 – seleção de variáveis de projeto;
11. R11 – determinação de parâmetros da otimização.

A Figura 3-3 mostra um esquema geral das rotinas e sua relação com o método de otimização e seus procedimentos. Para o melhor entendimento do funcionamento da rotina computacional, pode-se agrupar as rotinas em duas classes: rotinas de controle e rotinas específicas. As rotinas de controle são diretamente ligadas às características de avaliação da metodologia proposta e

gerenciam os dados de entrada e saída de outras rotinas (R1 a R4). As rotinas específicas visam o desenvolvimento de uma atividade específica que não está diretamente ligada à metodologia, mas é uma etapa auxiliar do processo (R5 a R10). Por exemplo, ler arquivos de saída do simulador, calcular o VPL de uma série temporal de fluxo de caixa, otimizar as variáveis de controle etc.

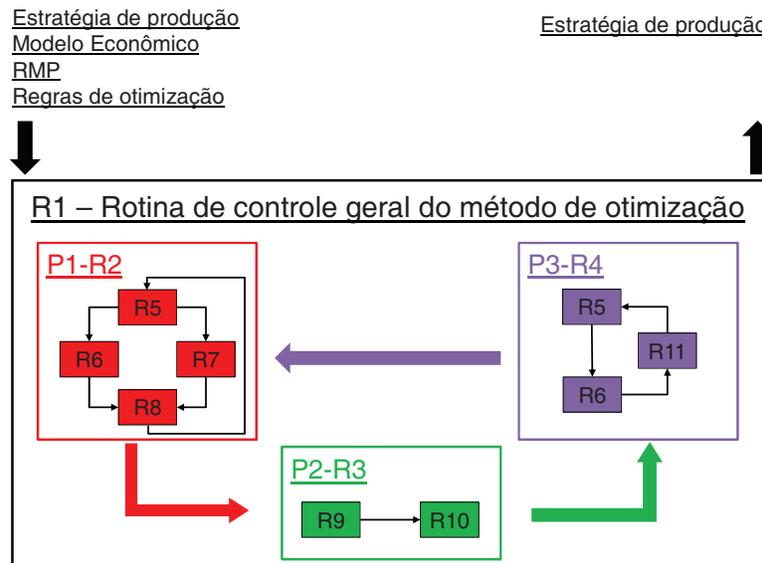


Figura 3-3: Esquema geral do uso de rotinas computacionais para desenvolvimento do MOD-P.

3.3.1 Rotinas de controle

As rotinas de controle do MOD-P executam os passos necessários para a aplicação da metodologia de otimização, executando mudanças dos parâmetros do método e regulando a distribuição de informação entre as diversas rotinas. Elas estão diretamente ligadas aos procedimentos descritos na Figura 3-2 e ao controle do método como um todo. Portanto, são elas que executam o algoritmo de otimização.

A rotina R1 controla as ligações entre os procedimentos P1, P2 e P3 e é responsável pelo fluxo de informação de entrada e saída dessas rotinas e do método de otimização. Os dados de entrada do método de otimização são: os arquivos de simulação com a estratégia de produção, o modelo econômico para avaliação do VPL e geração de indicadores econômicos, a indicação das RMP e as regras que serão utilizadas para o desenvolvimento do método. A saída da rotina é um arquivo de simulação com os dados da estratégia e um arquivo com os detalhes da execução do método. Os controles do fluxo de informações entre os procedimentos são feitos para auxiliar no

manuseio de matrizes e de variáveis de projeto e de controle. Portanto, a rotina R1 é a rotina principal que interage com todos os procedimentos do algoritmo.

A rotina R2 controla o fluxo interno de informação dentro do procedimento P1. Ela é responsável por padronizar os arquivos de saída do simulador para a execução do cálculo econômico, montar uma matriz com os indicadores de desempenho para cada RMP e avaliar o potencial de aplicação das válvulas.

A rotina R3 reconhece qual a localização da RMP com maior potencial e define os valores das variáveis de projeto após a avaliação de agrupamento das RMP. Portanto, esta rotina formata em linguagem computacional o que foi identificado pela análise dos indicadores com o objetivo de definir o problema de otimização do controle a ser executado no mesmo CE.

A rotina R4 executa o processo de otimização do controle conectando as rotinas de integração com a simulação, a avaliação econômica e a definição dos parâmetros do método. A cada iteração, a rotina avalia as respostas da avaliação econômica e define se o processo deve continuar sendo executado. Além disso, a rotina manuseia os dados de saída com os parâmetros do método de otimização para transformá-los em dados que possam ser utilizados pela rotina R5.

3.3.2 Rotinas específicas

As rotinas específicas são necessárias para executar trabalhos auxiliares como ler e formatar arquivos do simulador, ordenar matrizes e gerar indicadores. Elas estão distribuídas dentro das rotinas de controle conforme a Figura 3-3. A Tabela 3-3 apresenta os detalhes das rotinas específicas, apresentando os dados de entrada e de saída de cada uma das rotinas.

3.4 Validação

A validação é a etapa da metodologia realizada para comparar os resultados obtidos pela metodologia proposta com outro método de otimização. O objetivo é validar os resultados obtidos por meio de comparação com um método já testado na literatura, que gere resultados confiáveis e próximos do ótimo global. O método de algoritmo evolucionário (AE) é utilizado nesta comparação. Entretanto, esta comparação só é viável apenas em casos simples devido à grande quantidade de simulações requeridas para esta análise.

Tabela 3-3: Descrição geral das rotinas específicas utilizadas na programação computacional da metodologia proposta.

Rotina	Entrada	Saída	Observações
R5	Vetor de variáveis de projeto	Arquivos de texto com a produção	Executa o simulador; Gera produção para o campo, poços e RMP
R6	Matriz com dados de produção e modelo econômico	Arquivo de texto com o fluxo de caixa e VPL	Gera dados econômicos para o campo, poços e RMP
R7	Dados econômicos e de produção	Matrizes (21) e (22)	-
R8	Matrizes (21) e (22)	Matriz (23)	-
R9	Matriz (23)	Matriz (23) ordenada por potencial de aplicação	-
R10	Saída da R9	Vetor com as variáveis de decisão que serão alvo de otimização do controle	Rotina para avaliar o agrupamento de RMP para controle com uma única válvula
R11	Avaliação econômica do campo	Tempo de fechamento da válvula	Dado para ser utilizado na iteração seguinte

A validação é feita considerando os seguintes aspectos:

1. VPL do campo.
2. Número de válvulas sugeridas para o caso ótimo.
3. Tempo de produção do campo.
4. Número de simulações requeridas para atingir o caso otimizado.

O primeiro aspecto validado é o VPL do campo. Apesar de existir a possibilidade de diversas alternativas produzirem os resultados semelhantes, o VPL é a função-objetivo considerada neste trabalho e é utilizada como principal parâmetro de validação. Entretanto, devido à possibilidade de geração de estratégias com diferentes características de produção, o número de válvulas e o tempo de produção também são incluídos como parâmetros necessários para validar o método. Por último, é importante que a metodologia proposta atinja o seu máximo com um número de simulações compatível com as necessidades de um processo que demanda análises rápidas do número ótimo de válvulas.

O AE apresentado neste trabalho é planejado para encontrar a melhor configuração do controle de válvulas que maximizam o VPL. O objetivo é avaliar de forma exaustiva o problema de otimização do controle e garantir que o máximo VPL seja atingido para um determinado número e localização de válvulas. Portanto, o estudo do número ótimo de válvulas é feito utilizando-se diferentes casos com diferentes posicionamentos e números de válvulas.

3.4.1 Otimização utilizando algoritmo evolucionário (AE)

A aplicação do algoritmo evolucionário para otimização do controle de válvulas é realizada em duas etapas separadas. A primeira é a aplicação direta do método para solução do controle das válvulas. A segunda é a correção da solução apresentada pelo AE através de metodologia de ajuste com objetivo de redefinir o número de válvulas aplicadas. A descrição do AE é apresentada na seção 2.6.6, utilizando o VPL como função-objetivo e o tempo de fechamento da válvula como variável de decisão. Nesta seção é apresentada a metodologia de correção da solução.

A correção da solução é realizada por meio da avaliação da viabilidade da válvula i para casos cujo valor de t_{sd}^i está próximo do tempo de abandono do campo ou próximo do início da produção do poço. O objetivo é verificar se a retirada do investimento para aplicação da válvula traz vantagens.

A Figura 3-4 mostra 3 curvas do VPL em função do tempo de fechamento para exemplificação da ideia geral do uso da metodologia de correção. Os pontos A' , B' e C' representam os pontos de máximo das curvas a , b e c , respectivamente. Considera-se que o início da produção ocorre em t_{ini}^i e o tempo de abandono da produção ocorre em t_{aband}^i .

Considera-se ainda que, se uma válvula tem seu ponto ótimo de fechamento próximo ao início ou ao abandono da operação do campo, então, pode não haver a necessidade de aplicação da válvula. Portanto, pode-se desconsiderar o investimento necessário para aplicação da válvula neste caso. Este detalhe gera uma descontinuidade na curva do VPL em função do tempo de fechamento. Portanto, os pontos A'' , B'' , C'' e C''' representam o VPL corrigido para os casos em que o t_{sd}^i é igual a t_{ini}^i ou t_{aband}^i . A descontinuidade eleva o valor do VPL com uma soma igual ao investimento requerido para a instalação da válvula.

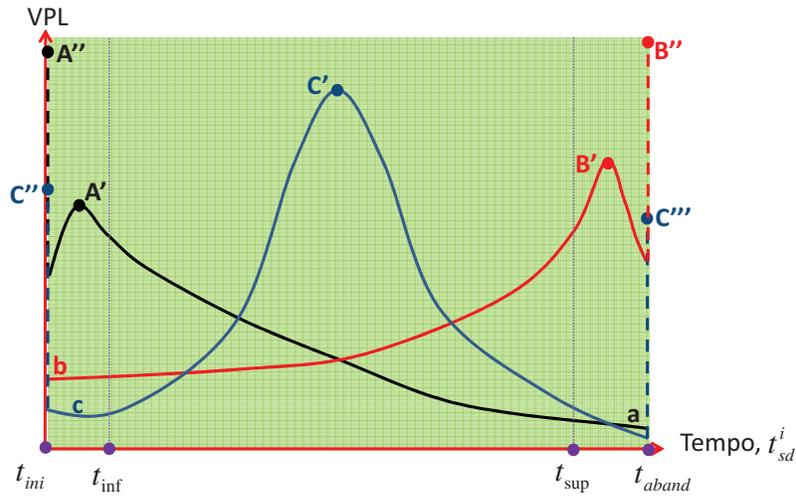


Figura 3-4: Exemplos de curva do VPL em função do tempo de fechamento de válvula de controle.

A metodologia para correção da solução utiliza dois parâmetros para determinar a aplicação da verificação da retirada de válvulas e seus respectivos investimentos. Os parâmetros são t_{inf} e t_{sup} , que são utilizados para determinar a execução da verificação com base no valor de t_{sd}^i . A verificação é feita se qualquer uma das seguintes condições for satisfeita:

$$t_{sd}^i - t_{ini} \leq t_{inf} \quad (24)$$

$$t_{aband} - t_{sd}^i \leq t_{sup} \quad (25)$$

Portanto, após a execução do algoritmo evolucionário, avalia-se a necessidade de executar a verificação para toda a válvula i inicialmente considerada na otimização do controle, $i = \{a \in N^* \mid a \leq n_v\}$. Observando a Figura 3-4, as soluções propostas pelas curvas a e b seriam verificadas para o caso de não considerar a instalação de válvulas.

3.5 Verificação do método de otimização proposto em casos mais complexos

A última fase de testes da metodologia proposta é a verificação da aplicação em casos mais complexos. Nesta categoria enquadram-se casos com mais poços, mais regiões de monitoramento a serem testadas e com tempo de simulação compatível com os casos práticos, dezenas de minu-

tos ou até horas. Devido à inviabilidade de aplicação do algoritmo evolucionário para todos os casos, para os casos em que o AE não foi utilizado, os parâmetros avaliados nesta verificação são qualitativos e com base em resultados apresentados na literatura.

Os parâmetros avaliados são:

1. Aumento do VPL.
2. Número de válvulas sugerido.
3. Capacidade de modificação da produção do campo.

4. APLICAÇÕES

Duas aplicações são propostas com o objetivo de validar e verificar a metodologia de otimização (MOD-P), exemplo E-1 (apenas validação) e E-2 (validação e verificação). Nas aplicações, são considerados diferentes cenários geológicos e econômicos. Portanto, pretende-se testar o método em diferentes casos para mostrar a eficácia de aplicação do MOD-P.

Dois modelos de reservatórios são propostos, um para cada exemplo. Um modelo mais simples, modelo M-1, e um modelo mais complexo, modelo M-2. M-1 representa uma parte de um reservatório com um poço produtor e dois injetores. Ele é usado para validar a metodologia no E-1. M-2 possui geologia e estratégia de produção mais complexas, com características de reservatório carbonático, e é utilizado no E-2. A cada modelo são atribuídos cenários geológicos diferentes.

O exemplo E-1 possui um único cenário econômico e o exemplo E-2 é constituído de 9 cenários econômicos. O objetivo é avaliação da viabilidade técnica do uso das válvulas nos diferentes cenários, além da avaliação do desempenho do método de otimização. Os cenários econômicos são compostos de diferentes preços do óleo e custos da água.

A estratégia inicial de produção de cada aplicação mantém-se fixa nos exemplos. Cada cenário é otimizado isoladamente de forma determinística para número e posição de válvulas de controle em poços produtores. A estratégia inicial de produção em E-1 é uma estratégia simples com poços horizontais, um poço produtor no centro e dois injetores nos extremos. A estratégia inicial de produção de E-2 é uma estratégia otimizada para número e posição de poços. A estratégia possui 9 poços produtores e 7 injetores, todos verticais.

Apresenta-se ainda neste capítulo, os parâmetros dos métodos de otimização, MOD-P e AE, e a descrição da modelagem do problema. Os parâmetros e as RMP são mantidos em todos os cenários. Portanto, pretende-se avaliar a eficiência do método utilizando as mesmas condições de modelagem do problema.

Neste trabalho, utilizam-se as seguintes definições para montagem dos exemplos:

- modelo de simulação de reservatório ou modelo de reservatórios: descreve todas as características de reservatórios necessárias para executar a simulação de reservatórios;
- modelo econômico: descreve o sistema econômico que será utilizado para a avaliação econômica a partir de variáveis do escoamento de fluidos no campo;
- modelo do sistema: descreve o sistema que se pretende otimizar. Este sistema é descrito de forma que as únicas variáveis de decisão são o número e a posição das válvulas. Neste modelo também são indicadas as RMP. Apenas o número e a posição das válvulas são considerados como variáveis de projeto do problema de otimização;
- problema de otimização: são as técnicas de otimização utilizadas e as características do problema modelado;
- árvore de derivação: é a árvore contendo todos os casos utilizados para a validação e verificação;
- estratégia inicial: estratégia utilizada como entrada do problema de otimização, em que todas as completações do poço definidas no modelo do sistema estão abertas e sem válvulas de controle para regular o fluxo, funcionando como um poço convencional.

4.1 E-1 – Exemplo simples para validação do método de otimização

E-1 foi criado com o objetivo de validar o método MOD-P e permitir a aplicação do AE de forma exaustiva. Portanto, o modelo de reservatórios é rápido o suficiente para permitir um grande número de simulações e ter potencial para a aplicação de válvulas de controle em poços produtores. Optou-se por utilizar um modelo simples que representasse parte de um reservatório com o objetivo de possibilitar uma rápida avaliação. Optou-se também por utilizar um canal, cruzando poços horizontais, para criar um desequilíbrio na frente de água e tornar mais atrativa a aplicação de válvulas.

4.1.1 M-1 – Modelo de reservatório utilizado para execução do exemplo E-1

O modelo M-1 corresponde a um reservatório paralelepípedo com o topo situado completamente no plano horizontal (Figura 4-1). A malha de simulação possui 8892 elementos distribuídos nas 3 dimensões com uma configuração de 28 x 57 x 6. Todos os elementos possuem o mesmo tamanho, sendo o comprimento, direção x , $l_{e \rightarrow x} = 20$ m, a largura, direção y , $l_{e \rightarrow y} = 20$ m, e a profundidade, direção z , $l_{e \rightarrow z} = 10$ m.

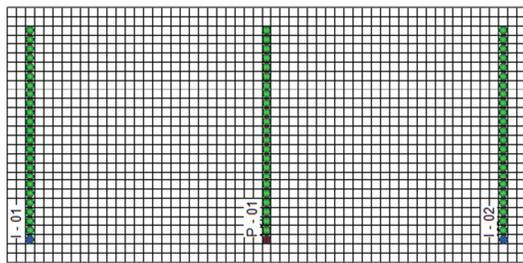


Figura 4-1: Malha de simulação e localização dos poços do modelo M-1.

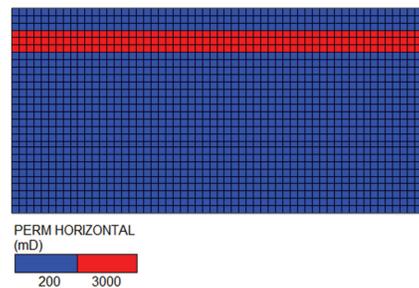


Figura 4-2: Permeabilidade horizontal do M-1.

Um poço produtor horizontal, P-01, está localizado no centro do reservatório e dois poços injetores, I-01 e I-02, estão simetricamente posicionados em relação ao produtor e localizados nos extremos do reservatório. Os poços têm comprimentos iguais e ocupam 24 elementos da malha de simulação. O poço P-01 está localizado na camada do topo e os poços I-01 e I-02 estão na camada de fundo.

A distribuição da porosidade é homogênea e igual a 0,30. O modelo é dividido em 2 zonas de permeabilidade. A Figura 4-2 mostra as zonas com diferentes permeabilidades, sendo a zona de mais alta permeabilidade representada pela cor vermelha e a de mais baixa permeabilidade pela cor azul. A maior parte do reservatório, de cor azul, tem permeabilidade homogênea e igual a 300 mD nas direções do plano horizontal e de 30 mD na direção vertical. A outra parte está localizada transversalmente à direção dos poços, ocupando 3 elementos da malha de simulação e pas-

sando pela parte extrema dos poços. Esta região representa um canal homogêneo de alta permeabilidade.

Cinco variações do modelo são criadas com diferentes permeabilidades da região do canal. Os valores da permeabilidade em qualquer das direções do plano horizontal são 500, 750, 1000, 2000 e 3000 mD, compondo os casos M-1a, M-1b, M-1c, M-1d e M-1e, respectivamente. A permeabilidade na direção vertical é calculada como 10% da permeabilidade na direção horizontal.

A vazão de líquidos do produtor é limitada em 2000 m³/dia e a pressão mínima de fundo do poço é igual a 200 bar. Para cada injetor, a vazão de líquidos é limitada em 1000 m³/dia e a pressão máxima de fundo do poço é igual a 325 bar.

O reservatório não apresenta capa de gás nem aquífero. Todo o reservatório está inicialmente preenchido com óleo e água, na saturação de água conata. A Figura 4-3 mostra a curva de permeabilidade relativa do óleo e da água em função da saturação de água. Observa-se que a interação entre óleo e água diminui significativamente a permeabilidade relativa do óleo e que a permeabilidade relativa da água tem um crescimento relativamente baixo com o aumento da saturação de água.

A Figura 4-4 mostra as curvas de viscosidade e fator volume-formação do óleo. Considerando que o reservatório vai operar entre a pressão mínima de fundo do poço, 200 bar, e a pressão máxima de fundo dos injetores, 400 bar, observa-se que a viscosidade do óleo ficará em torno de 1,5 cp, podendo alcançar um valor próximo de 1 cp, para o caso mais favorável ao escoamento do óleo. Observa-se também que, em condições de reservatório, o fator volume-formação sofre alterações entre 1,35 e 1,40. Portanto, em sua maior parte, o reservatório irá operar em condições subsaturadas, com fluido de baixa viscosidade e sem alterações significantes no fator volume-formação do óleo.

Outras informações relevantes sobre as condições do reservatório são:

- pressão de bolha: 210 bar.
- pressão inicial no topo do reservatório: 316 bar.

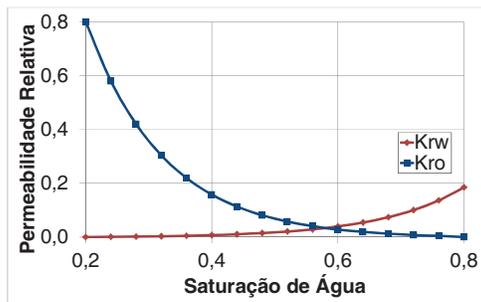


Figura 4-3: Curva de permeabilidade relativa para óleo e água no M-1.

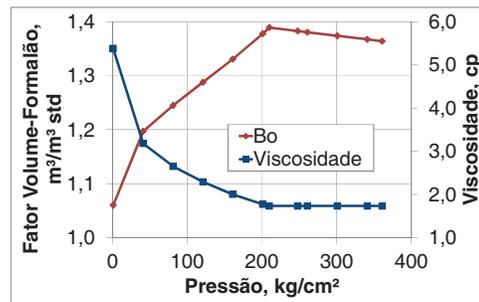


Figura 4-4: Curvas de viscosidade e fator volume-formação para o óleo no M-1.

Devido às condições provocadas pela existência de um canal de permeabilidade, a produção da estratégia inicial tem características de rápido declínio da produção de óleo e rápido aumento da produção de água (Figura 4-5). A Figura 4-6 mostra o comportamento do corte de água em diferentes completações ao longo do poço produtor. Observa-se que existe uma significativa diferença em relação ao momento da chegada de água entre as completações. Também se observa o aumento abrupto do corte de água para todas as completações. Portanto, as características do modelo M-1 são de um forte aumento da produção de água com distribuição irregular do corte de água ao longo do poço. Portanto, este modelo favorece a utilização de válvulas de controle.

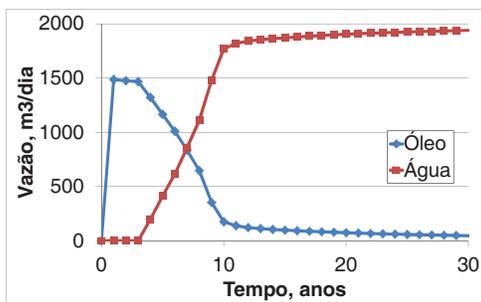


Figura 4-5: Vazão média diária de óleo e água para o Modelo 1c.

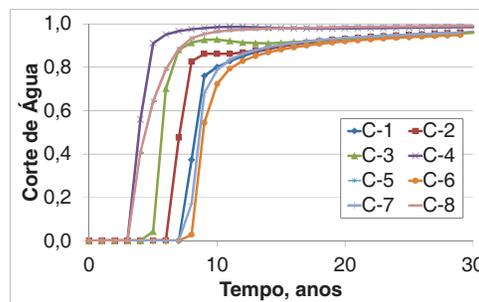


Figura 4-6: Corte de água em diferentes completações do poço produtor para o Modelo 1c.

4.1.2 ME-1 – Modelo econômico utilizado para a execução do exemplo E-1

O modelo econômico ME-1 é utilizado para o cálculo dos indicadores econômicos do reservatório, do poço P-01 e das RMP definidas no modelo do sistema. Neste caso, os indicadores econômicos de campo e poço são os mesmos, devido à existência de um único poço. O FCL é utilizado como valor de base para o cálculo de outros indicadores, como o VPL.

O modelo econômico para o campo tem como base o modelo do sistema fiscal brasileiro. O FCL no tempo é estimado pela equação (26). O preço e o custo do gás produzido são desconsiderados neste modelo. O modelo econômico utilizado para avaliação econômica das válvulas não considera o modelo fiscal brasileiro. Ele é descrito apenas pela diferença entre a receita gerada pelo óleo e os custos relacionados às produções de óleo e água, descontados no tempo pela taxa mínima de atratividade. Taxas, impostos e contribuições não são considerados devido às regras imposta pelo sistema fiscal brasileiro, equação (27). O algoritmo detalhado de cálculo da função econômica pode ser visto em Pinto (2013)

$$FCL_{campo}(t) = f(N_p(t), W_{ap}(t), W_{ai}(t), P_o, C_o, C_{ap}, C_{ai}, TMA, IR, CS, Inv_{ini}, Inv_v, Roy) \quad (26)$$

$$FCL_v(t) = f(N_p(t), W_{ap}(t), P_o, C_o, C_{ap}, TMA) \quad (27)$$

Os investimentos em válvulas são função do número de válvulas presentes em um poço. A primeira válvula instalada possui um valor mais alto, pois se atribui a ela os custos iniciais com instalações elétricas, cabos, e outros equipamentos e serviços necessários para operá-la. A partir da segunda válvula, atribui-se um valor menor para cada válvula, pois se considera que parte dos investimentos feitos para a primeira válvula não precisarão mais ser feitos. A Tabela 4-1 mostra os parâmetros utilizados para o cálculo dos indicadores econômicos do modelo ME-1.

4.1.3 MS-1 – Modelo de caracterização do sistema para o exemplo E-1

O modelo do sistema, MS-1, caracteriza a descrição geométrica do sistema, as entradas e saídas do sistema e a descrição do sistema de controle. A descrição geométrica do sistema define as posições das 8 RMP que serão usadas para estabelecer o local em que as válvulas podem ser instaladas e onde as informações são coletadas. Os dados de entrada do sistema são o modelo econômico ME-1, o modelo de reservatórios M-1, e a estratégia de produção. Os dados de saída

do sistema são as informações econômicas e de produção do campo, do poço P-01 e 8 RMP. A definição do sistema de controle admite a discretização de 30 tempos igualmente distribuídos em 30 anos de produção.

Tabela 4-1: Parâmetros utilizados no modelo econômico para cálculo do fluxo de caixa líquido do campo, poço e RMP.

Parâmetros econômicos	Valores
Preço do óleo (P_o)	50,00 USD/bbl
Custo de produção do óleo (C_o)	6,00 USD/bbl
Custo de produção da água (C_{ap})	1,00 USD/bbl
Taxa mínima de atratividade (TMA)	0,13
Custo da injeção de água (C_{ai})	1,00 USD/bbl
Imposto sobre a renda (IR)	25%
Royalties (Roy)	10%
Contribuição social (CS)	9%
Investimentos iniciais (Inv_{ini})	USD 200.000.000,00
1ª ICV no poço (Inv_v)	USD 1.000.000,00
2ª ou + ICV no poço (Inv_v)	USD 350.000,00

A Figura 4-7 apresenta a descrição geométrica do sistema proposto. O sistema divide o poço P-01 em 8 RMP, distribuídas igualmente ao longo do poço. Cada RMP ocupa 3 elementos da malha de simulação, sendo que cada elemento tem largura igual a $l_{e \rightarrow y} = 20$ m. O ponto de referência para determinação das variáveis de localização da válvula, s_1 e d , é o início do poço e o seu valor na trajetória do poço P-01 (WT^1) é igual a 0 m. Portanto, o valor de s_1^i para uma válvula i pode assumir os valores da progressão aritmética $s_1^i = (r-1) \times 60$, sendo $r = \{c \in N^* \mid c \leq 8\}$. O valor de d^i pode assumir os valores $d^i = (n_r^i - 1) \times 60 + 60$, desde que $s_1^i + d^i \leq wl$.

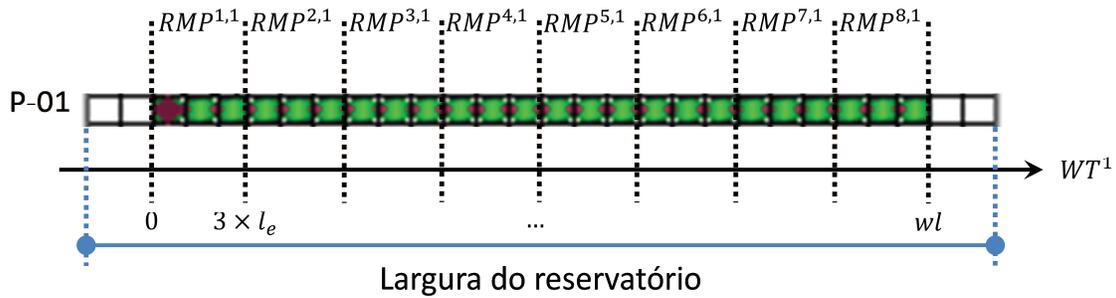


Figura 4-7: Descrição geométrica do modelo de sistema MS-1.

O sistema de controle definido para o exemplo E-1 considera uma válvula tipo abre-fecha com a possibilidade de apenas um fechamento. Portanto, a válvula depois de fechada não permite a sua reabertura. O fechamento da válvula pode ocorrer em qualquer tempo durante o período estimado de produção do reservatório que é de 30 anos. Porém, o tempo é discretizado em 30 períodos de 1 ano, $k = \{c \in N^* \mid c \leq 30\}$. O vetor apresentado na equação (28) representa o vetor de fração de fechamento da válvula i , sendo que $x = \{b \in N \mid b = [0,1]\}$. Se $x = 0$, a válvula está completamente fechada, e se $x = 1$, a válvula está completamente aberta.

$$\hat{w}^T = \{x^{1,i,1} \dots x^{30,i,1}\} \quad (28)$$

O vetor pode ser completamente descrito pela determinação do valor do tempo de fechamento da válvula t_{sd} . Os valores de x para os tempos anteriores a t_{sd} serão iguais a 1 e os valores acima serão iguais a 0.

A Figura 4-8 ilustra o sistema de avaliação e alteração do controle das válvulas. O controle das válvulas é feito com base na simulação de reservatórios e na avaliação econômica de longo prazo. O controle é alterado até que os objetivos definidos sejam alcançados.

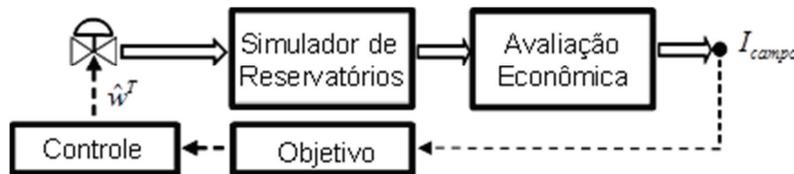


Figura 4-8: Sistema utilizado para alteração do controle com base em informações de longo prazo geradas por simulação de reservatórios.

4.1.4 Descrição do problema de otimização

Dois problemas de otimização são elaborados. Um para solucionar o número e a posição das válvulas de controle, solucionado pelo método de otimização MOD-P, e outro para resolver apenas o problema da configuração do controle, solucionado pelo método de otimização AE, mas com uma posterior correção do número de válvulas. Apesar de o objetivo final do uso dos dois métodos ser o de avaliar o número e a posição das válvulas, o método de AE é utilizado de forma indireta para alcançar tal objetivo. Portanto, a solução obtida pelo método AE é a melhor configuração do controle para um determinado número e posição de válvulas, sendo que a otimização do número e posição das válvulas é feita por múltiplas aplicações com diferentes números e posição de válvulas.

4.1.4.1 Problema de otimização para o método MOD-P

O problema de otimização é descrito pela equação (29), determinando-se as variáveis de decisão número de válvulas (n_v), posição das válvulas (\hat{v}) e controle das válvulas (\hat{w}) para a maximização do VPL do campo. Além disso, n_v é dado em números naturais, o vetor \hat{v} é dado em função de valores de s_1 e d e o vetor \hat{w} são dados em função dos valores de x .

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar: } f(n_v, \hat{v}, \hat{w}), & (29) \\ & \text{Sujeito a: } g_j(\hat{u}) \leq 0; \quad j=1, \dots, 7 \times n_v \\ & \hat{u}^l \leq \hat{u} \leq \hat{u}^u \end{aligned}$$

Com base nos modelos M-1 e MS-1, as variáveis de decisão estão submetidas a 7 restrições apresentadas nas equações a seguir (equação (30) à equação (35)).

A função-objetivo adotada é o VPL do campo e ele é calculado com base na equação (26).

O problema de otimização que envolve o método MOD-P para solucionar o problema proposto no exemplo E-1 é denominado MOD-P1.

$$g_1(\hat{u}) = n_v \leq 8 \quad (30)$$

$$g_1(\hat{u}) = -n_v \leq 0$$

$$g_2(\hat{u}) = s_1^{i,1} + d^{i,1} - wl^1 \leq 0 \quad (31)$$

$$g_2(\hat{u}) = s_1^{i,1} + d^{i,1} - s_1^{i+1,1} \leq 0$$

$$g_3(\hat{u}) = x^{k+1,i,1} - x^{k,i,1} \leq 0 \quad (32)$$

$$g_4(\hat{u}) = 60 - d^{i,1} \leq 0 \quad (33)$$

$$g_4(\hat{u}) = d^{i,1} - 480 \leq 0$$

$$g_6(\hat{u}) = -s_1 \leq 0 \quad (34)$$

$$g_6(\hat{u}) = s_1^{i,1} - wl^1 + 60 \leq 0$$

$$g_7(\hat{u}) = -x \leq 0 \quad (35)$$

$$g_7(\hat{u}) = x - 1 \leq 0$$

4.1.4.2 Critérios adotados para o método MOD-P

Os critérios adotados para a execução do método MOD-P são apresentados na Tabela 4-2. Como o caso é uma parte específica do campo, os critérios de campo, C₂ e C₃, não foram considerados para as análises desses casos. O critério C₁ foi introduzido para avaliar a possibilidade a possibilidade de pagamento do único poço.

Tabela 4-2: Critérios adotados para execução do método MOD-P no problema MOD-P1.

Critério	Escala	Valor
C ₁	Campo	0,10
C ₂	Poço	-0,05
	Região	-0,10
C ₃	Poço	0,05
	Região	0,10
C ₄	Região	0,075
C ₅	Região	0,10

4.1.4.3 Problema de otimização para o método AE

O problema de otimização é descrito pela equação (36), determinando-se as variáveis de decisão do controle das válvulas (\hat{w}) para a maximização do VPL do campo. O vetor \hat{w} é dado em função dos valores de x .

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar: } f(\hat{w}), & (36) \\ &\text{Sujeito a: } g_j(\hat{u}) \leq 0; \quad j = 1, \dots, 3 \times n_v \\ &\quad \hat{u}^l \leq \hat{u} \leq \hat{u}^u \end{aligned}$$

Com base nos modelos M-1 e MS-1, cada variável de controle está submetida a 3 restrições apresentadas nas equações a seguir (Equação (37) e Equação (38)).

$$g_1(\hat{u}) = x^{k+1,i,1} - x^{k,i,1} \leq 0 \quad (37)$$

$$g_2(\hat{u}) = -x \leq 0 \quad (38)$$

$$g_3(\hat{u}) = x - 1 \leq 0$$

A função-objetivo adotada é o VPL do campo e ele é calculado com base na equação (26).

Para solucionar o problema de número e posição das válvulas no poço, optou-se por dividir o problema mais geral, AE-1, em 3 problemas subproblemas, AE-1a, AE-1b e AE-1c. Cada subproblema possui diferentes parâmetros prefixados para o número e a posição das válvulas de controle. Portanto, os subproblemas solucionam o problema de controle para um determinado número e posição das válvulas. A solução do problema geral AE-1 será a melhor configuração de número e posição das válvulas com base no VPL das estratégias otimizadas para o controle dos 3 subproblemas.

A Tabela 4-3 apresenta os parâmetros prefixados para os 3 casos utilizados no exemplo E-1.

Após a otimização via AE a avaliação da solução e a possível correção é executada utilizando os valores de $t_{\text{inf}} = t_{\text{sup}} = 2 \text{ anos}$.

Tabela 4-3: Parâmetros prefixados para execução do método AE no exemplo E-1.

Problema	n_v	Número de gerações	População por geração	Taxa de cruzamento	Indivíduos de elite	s_1 (m)	d (m)
AE-1a	1	7	5	0,6	1	$s_1^{1,1} = 240$	$d^{1,1} = 240$
AE-1b	3	15	8	0,6	1	$s_1^{1,1} = 120$ $s_1^{2,1} = 240$ $s_1^{3,1} = 360$	$d^{1,1} = 120$ $d^{2,1} = 120$ $d^{3,1} = 120$
AE-1c	7	40	20	0,7	2	$s_1^{1,1} = 60$ $s_1^{2,1} = 120$ $s_1^{3,1} = 180$ $s_1^{4,1} = 240$ $s_1^{5,1} = 300$ $s_1^{6,1} = 360$ $s_1^{7,1} = 420$	$d^{1,1} = 60$ $d^{2,1} = 60$ $d^{3,1} = 60$ $d^{4,1} = 60$ $d^{5,1} = 60$ $d^{6,1} = 60$ $d^{7,1} = 60$

4.1.5 Árvore de derivação de casos criados para avaliação do número e da posição de válvulas

A Figura 4-9 mostra a árvore de derivação com todos os casos criados para avaliar o exemplo E-1. Ao todo, 20 casos foram criados. O primeiro nível da árvore é o modelo de reservatórios M-1, base para todos os casos. O segundo nível é dividido em 5 ramos para os diferentes modelos de reservatórios com diferentes permeabilidades para a região do canal, M-1a, M-1b, M-1c, M-1d e M-1e. No terceiro e no quarto nível, o número de ramos é mantido. O terceiro nível representando o modelo econômico ME-1 e o quarto nível, o modelo do sistema para avaliação de válvulas de controle. O quinto nível possui 20 ramos, sendo quatro subdivisões para cada ramo que chega ao nível 5. Os quatro ramos representam os quatro problemas de otimização que são executados no exemplo E-1.

O primeiro ramo do quinto nível é o problema de achar o número e posição das válvulas utilizando o método MOD-P. Os outros 3 ramos representam 3 diferentes problemas de otimização da configuração do controle com diferentes parâmetros iniciais para a posição e para o número de válvulas, modelados por AE-1a, AE-1b e AE-1c.

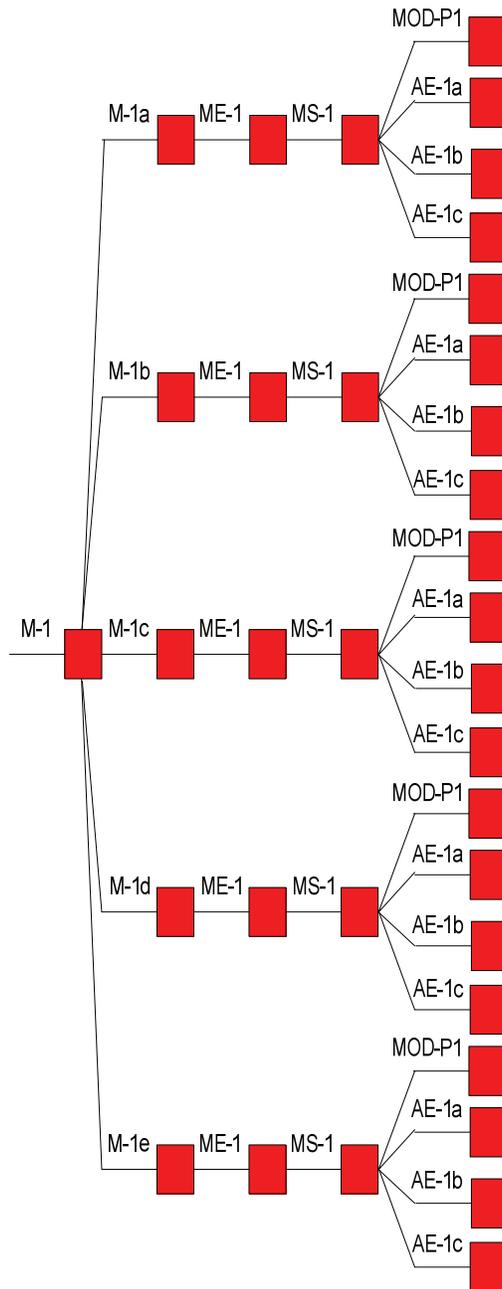


Figura 4-9: Árvore de derivação com todos os casos utilizados no exemplo E-1.

Concluindo, tem-se uma combinação dos 5 diferentes modelos de reservatórios com os 2 métodos de otimização utilizados neste exemplo. Portanto, os resultados obtidos com o método

MOD-P para os 5 modelos podem ser comparados com os resultados das 3 aplicações do método AE para os mesmos 5 modelos.

4.2 E-2 – Exemplo de validação e verificação do método de otimização em casos complexos

O exemplo E-2 é criado para validação e verificação do método proposto, MOD-P, de uma forma mais complexa e próxima à realidade de um estudo de otimização de estratégia de produção em casos reais, com o objetivo da comprovação de sua utilidade prática. Portanto, o exemplo E-2 é constituído de um modelo de reservatórios com elevado tempo de simulação, diversidade geológica, com fluxo irregular ao longo dos poços e diversos modelos econômicos, que garantem a avaliação do uso de válvulas de controle em cenários diversos.

Assim como no exemplo E-1, a validação é executada comparando-se a solução obtida por meio do método MOD-P com a solução encontrada pelo AE. Entretanto, a validação é realizada apenas para o ME base, sendo que para os outros 8 ME, apenas a verificação é aplicada. A validação não é aplicada para os outros ME devido ao alto custo computacional necessário para a atividade e por se considerar que a aplicação em um único ME é suficiente para comprovação da eficiência da metodologia.

Esta seção é dividida considerando-se o mesmo ordenamento da seção do exemplo E-1. Inicialmente apresenta-se o modelo de reservatórios e a estratégia de produção inicial, caracterizando o modelo M-2. Em seguida, apresentam-se os modelos econômicos, ME-2, e o sistema adotado para aplicação do método de otimização, MS-2. O problema de otimização é caracterizado e os parâmetros e variáveis são definidos no quarto e quinto tópico desta seção. Por último, apresenta-se a árvore de derivação que representa os casos avaliados neste exemplo.

4.2.1 M-2 – Modelo de reservatórios e estratégia inicial para verificação do método de otimização MOD-P

O modelo M-2 é um modelo sintético, construído com base no modelo de reservatório carbonático apresentado por Adams (2005). Este modelo é a representação de um reservatório resultante da formação de carbonatos microbiais, que é conceitualmente a base para a formação dos

reservatórios da região pré-sal no Brasil. Ele é um modelo heterogêneo, com relevantes variações na permeabilidade e porosidade espacial e diferentes camadas verticais, sendo também parcialmente fraturado (Figura 4-10 a Figura 4-13). Não possui aquífero nem capa de gás. Utiliza-se o método de injeção de água para recuperação do óleo.

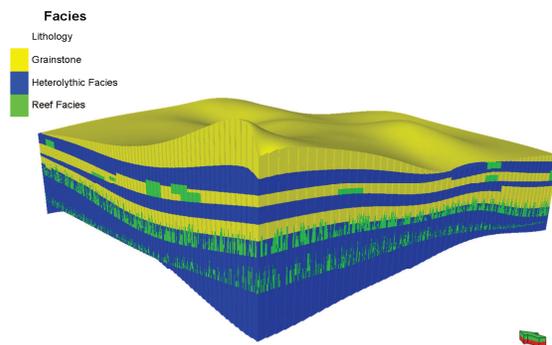


Figura 4-10: Distribuição litológica do M-2.

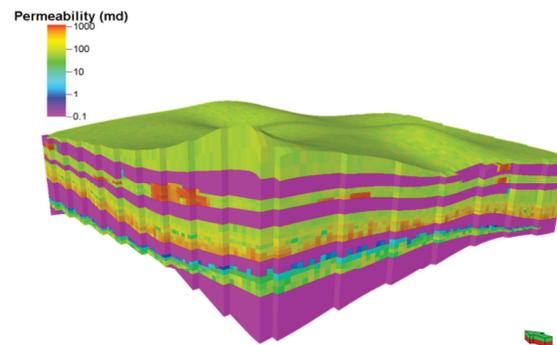


Figura 4-11: Permeabilidade no plano horizontal do M-2.

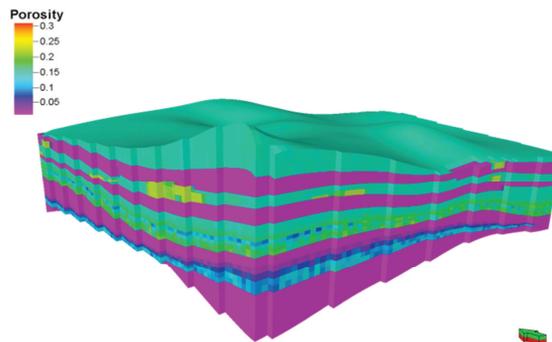


Figura 4-12: Distribuição da porosidade do M-2.

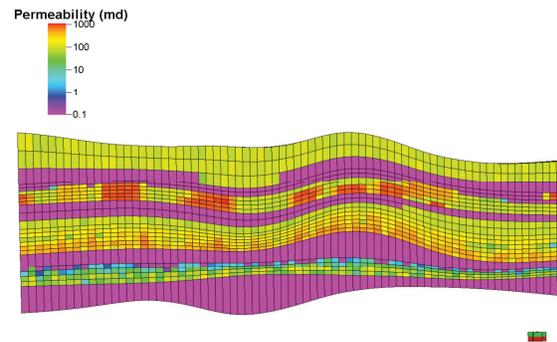


Figura 4-13: Distribuição da permeabilidade em uma seção do M-2.

O objetivo do uso deste modelo é a verificação da metodologia de otimização MOD-P em um reservatório complexo e com escoamento de água irregular ao longo dos poços, que tenha potencial para a aplicação de válvulas de controle. Além disso, pretende-se avaliar o desempenho de uso das válvulas em um reservatório com algumas características conceitualmente similares às encontradas na região do pré-sal brasileiro.

O tamanho do reservatório é de 6000 x 5000 x 80 m. A Figura 4-14 e a Figura 4-15 mostram a distribuição das fraturas do reservatório. Dois tipos de fratura estão presentes: as fraturas

de alta permeabilidade (em vermelho) e as falhas selantes (em rosa). O fator sigma representa o termo de transferência de fluido entre matriz fratura. Portanto, quanto maior o fator sigma, mais facilmente o fluido escoa. As fraturas de alta permeabilidade possuem permeabilidade igual a 2000 mD e espaçamento de fratura 10 m (Figura 4-16). As fraturas selantes tem permeabilidade próxima a 0 mD.



Figura 4-14: Vista superior da distribuição das fraturas de alta permeabilidade e selantes.

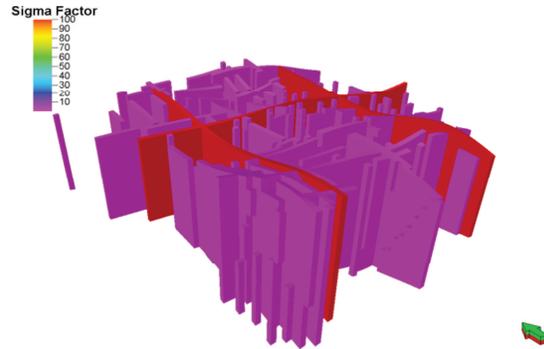


Figura 4-15: Perspectiva da distribuição das fraturas de alta permeabilidade e selantes.

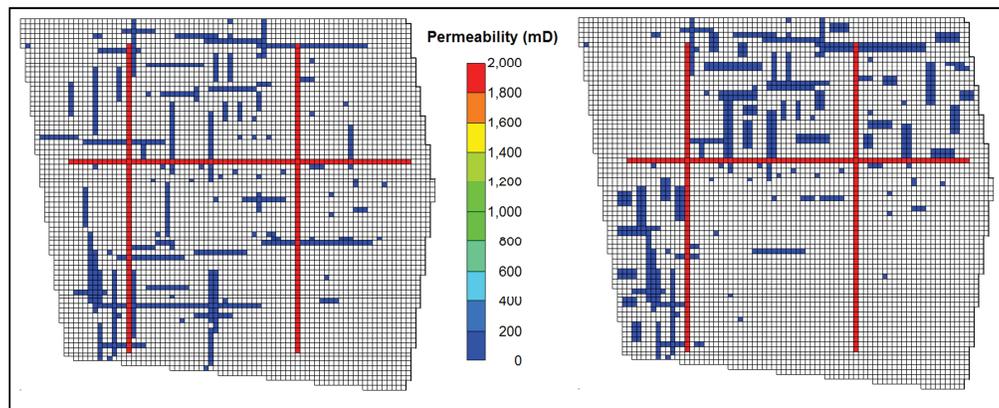


Figura 4-16: Falhas selantes (azul) e fraturas permeáveis dos modelos M-2a, esquerda, e M-2b, direita.

Quatro diferentes casos são criados com diferentes configurações das fraturas selantes, M-2a, M-2b, M-2c e M-2d. Entretanto, as fraturas de alta permeabilidade são mantidas fixas em todos os modelos. Com isso, obtém-se um escoamento de água diferenciado para cada modelo e também diferentes distribuições de pressão. Outras informações sobre o modelo estão na Tabela 4-4.

Tabela 4-4: Parâmetros do modelo de reservatório.

Atributos	Valor
Pressão inicial do reservatório	327 kgf/cm ²
Pressão de bolha	210 kgf/cm ²
Densidade do óleo	866 kg/m ³
Compressibilidade do óleo acima da pressão de saturação	1,76x10 ⁻⁶ (kgf/cm ²)-1
Saturação inicial de água	0,2
Compressibilidade da água	49x10 ⁻⁶ (kgf/cm ²)-1
Viscosidade da água	0,6 cp
Densidade da água	1010 kg/m ³
Fator volume-formação da água	1,043

A malha do modelo é composta por 158.928 elementos, sendo o plano horizontal constituído por 86 e 77 elementos, e na direção vertical, 24 elementos. Cada bloco possui dimensões areais de $l_{e \rightarrow x} = 70\text{m}$ e $l_{e \rightarrow y} = 70\text{m}$ e profundidade variável. A malha é do tipo dupla-porosidade, sendo uma para as fraturas e outra para a matriz.

O modelo possui diferentes propriedades petrofísicas para a componente de matriz e para a componente de fratura. As Figura 4-17 e Figura 4-18 mostram respectivamente, as curvas de permeabilidade relativa de óleo e água para a matriz e a fratura, enquanto as Figura 4-19 e Figura 4-20 ilustram as curvas de razão de solubilidade do gás no óleo (R_s) e do fator volume de formação do óleo (B_o) e viscosidade, respectivamente.

Este modelo de reservatório teve os seguintes parâmetros da estratégia inicial otimizados em Botechia (2012): capacidade da plataforma, número e posição dos poços. A estratégia de produção foi otimizada considerando os modelos M-2a, M-2b, M-2c e M-2d. A estratégia apresentada na Figura 4-21 possui 9 poços produtores verticais, Prod-1, Prod-2, Prod-3, Prod-4, Prod-5, Prod-6, Prod-7, Prod-8 e Prod-9, e sete injetores verticais, Inj-1, Inj-2, Inj-3, Inj-4, Inj-5, Inj-6 e Inj-7. Os poços estão completados inicialmente nas 24 camadas do reservatório.

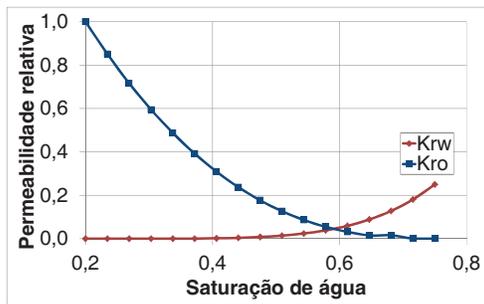


Figura 4-17: Curvas de permeabilidade relativa do óleo e água para a matriz.

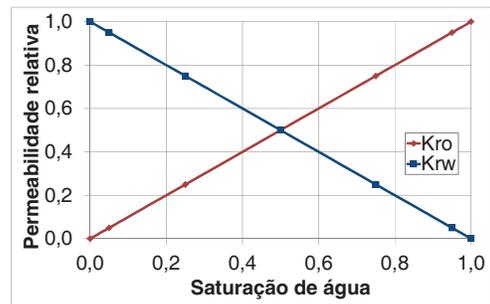


Figura 4-18: Curvas de permeabilidade relativa do óleo e água para a fratura.

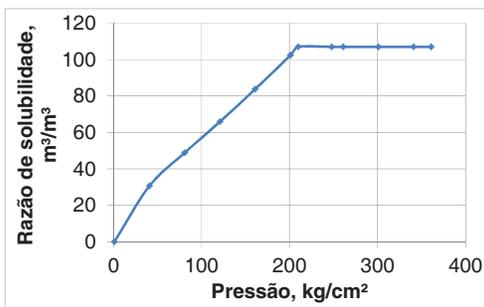


Figura 4-19: Curva de razão de solubilidade do gás no óleo.

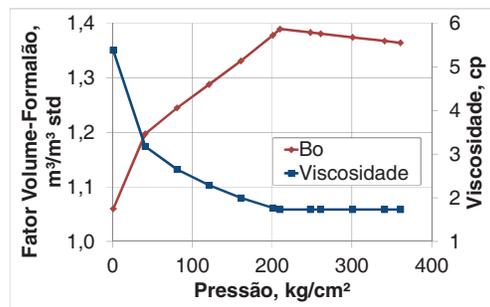


Figura 4-20: Curvas do fator volume-formação e de viscosidade do óleo.

As condições operacionais dos poços produtores são de vazão máxima de líquido igual a 800 m³/dia e a pressão mínima de fundo do poço igual a 200 bar. Os poços injetores operam com limite máximo de vazão de água 1400 m³/dia e pressão máxima de fundo do poço de 400 bar. As condições operacionais de plataforma são de máxima vazão de produção de líquido de 7220 m³/dia e de máxima vazão de injeção de água de 13000 m³/dia.

As Figura 4-22 à Figura 4-25 mostram a produção e a injeção acumulada para o campo nos 4 modelos de reservatório. Observa-se que os modelos M-2a e M-2b tem uma produção e injeção acumulada similar, enquanto que os modelos M-2c e M-2d tem produção e injeção acumuladas mais baixas. Portanto, os modelos considerados possuem diferentes potenciais de produção e injeção e têm potencial para geração de diferentes resultados com o uso de válvulas de controle.

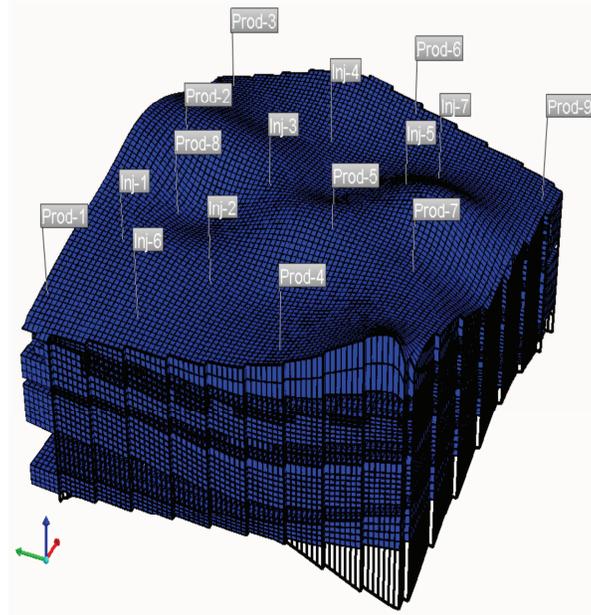


Figura 4-21: Estratégia de produção utilizada no E-2 e otimizada para número e posição dos poços no trabalho de Botechia (2012).

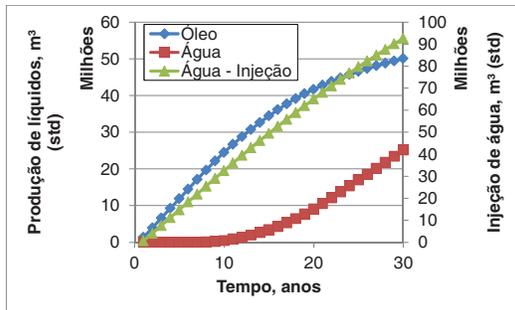


Figura 4-22: Produção e injeção acumulada para a estratégia inicial no modelo M-2a.

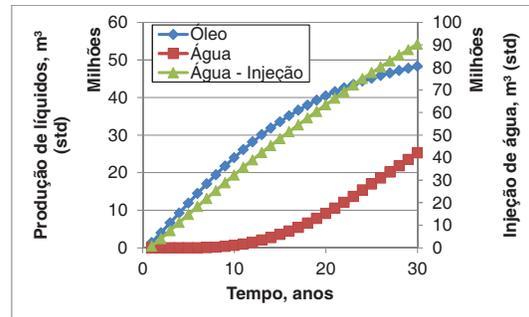


Figura 4-23: Produção e injeção acumulada para a estratégia inicial no modelo M-2b.

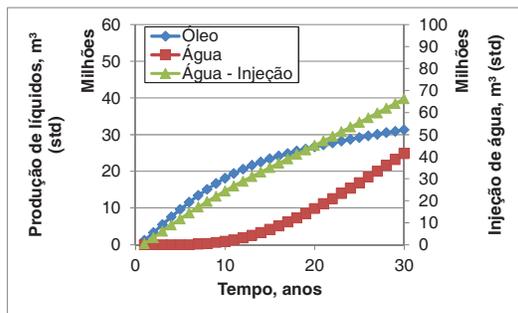


Figura 4-24: Produção e injeção acumulada para a estratégia inicial no modelo M-2c.

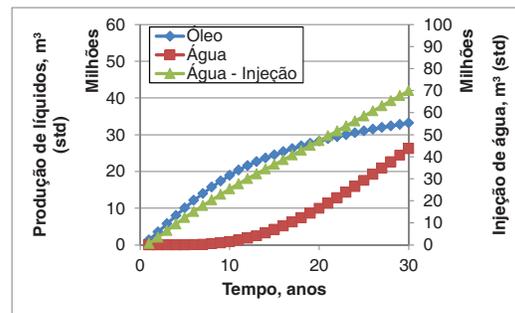


Figura 4-25: Produção e injeção acumulada para a estratégia inicial no modelo M-2d.

A Figura 4-26 mostra que os casos M-2a e M-2b têm uma produção no limite ou próxima do limite da capacidade de produção de líquidos do campo. Por outro lado, os modelos M-2c e M-2d possuem uma produção significativamente aquém da capacidade de produção da plataforma. Portanto, os modelos utilizados possuem diferenças significativas no comportamento da operação do campo.

A Figura 4-27 mostra a evolução do corte de água nos poços produtores do modelo M-2a. Observa-se que o comportamento do corte de água ao longo do tempo entre os poços é diferente. Enquanto no poço Prod-1, a erupção da água ocorre próximo ao início da operação, no poço Prod-3 a água chega ao poço após o 15º ano de produção. Observar-se também outros comportamentos diferentes entre os poços, como tempo de fechamento de poços e produção de água ao longo do poço. Isto garante uma diferenciação da produção entre os poços, o que também garante diferentes potenciais para aplicação de válvulas de controle.

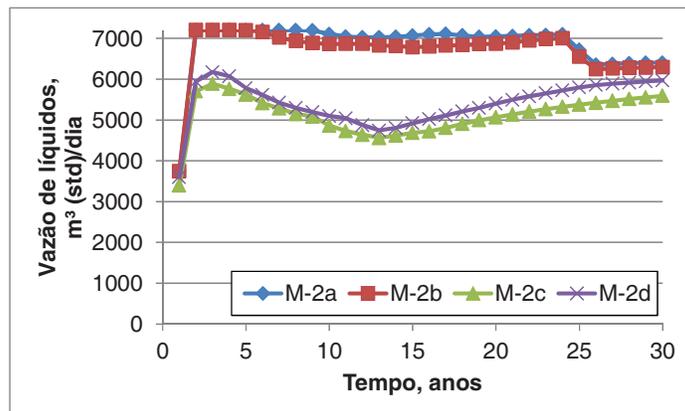


Figura 4-26: Vazão de líquidos diária média anual para os modelos de reservatório do exemplo E-2.

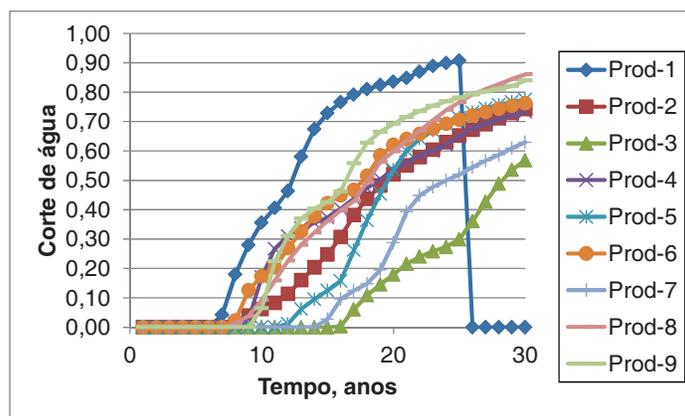


Figura 4-27: Corte de água para os poços produtores no modelo M-2a.

Conclui-se que os modelos apresentados possuem características diversas quanto ao escoamento no reservatório e no poço, possibilitando uma análise do método MOD-P em diferentes aspectos.

4.2.2 ME-2 – Modelo econômico utilizado para a execução do exemplo E-2

O modelo econômico ME-2 é utilizado para o cálculo dos indicadores econômicos do reservatório, dos poços produtores e todas as RMP definidas no modelo do sistema. O modelo possui 9 cenários diferentes considerando preço de venda do óleo e custo da água produzida. O modelo segue o mesmo padrão do ME-1 e tem como base o modelo do sistema fiscal brasileiro e as equações (26) e (27).

A Tabela 4-5 apresenta os parâmetros comuns aos nove cenários do modelo econômico. A Tabela 4-6 apresenta o preço do óleo e o custo de produção da água para todos os cenários do modelo ME-2.

Tabela 4-5: Parâmetros utilizados no modelo econômico para cálculo do fluxo de caixa líquido do campo, poço e RMP.

Parâmetros econômicos	Valores
Custo de produção do óleo (C_o)	62,90 USD/m ³
Taxa mínima de atratividade (TMA)	0,09
Custo da injeção de água (C_{ai})	6,29 USD/m ³
Imposto sobre a renda (IR)	25%
Royalties (Roy)	10%
Contribuição social (CS)	9%
Investimentos iniciais (Inv_{ini})	USD 50.000.000,00
Investimentos em plataforma (Inv_{plat})	USD 634.000.000,00
Investimento em poços ($Inv_{poço}$)	USD 65.000.000,00
Custo de abandono trazido para o presente	USD 47.000.000,00
1ª ICV no poço (Inv_v)	USD 1.000.000,00
2ª ou + ICV no poço (Inv_v)	USD 300.000,00

4.2.1 MS-2 – Modelo de caracterização do sistema para o exemplo E-2

O modelo do sistema, MS-2, caracteriza a descrição geométrica do sistema, as entradas e saídas do sistema e a descrição do sistema de controle. A descrição geométrica do sistema define as posições das 24 RMP que serão usadas para estabelecer o local onde as válvulas podem ser instaladas em cada poço produtor do M-2 e onde as informações são coletadas. As entradas do sistema são os modelos econômicos gerados a partir do ME-2, de reservatórios M-2, e a estratégia de produção inicial utilizada para todos os casos. As saídas do sistema são as informações econômicas e de produção do campo, dos 9 poços produtores e 216 RMP. Alterações no controle do sistema são realizadas anualmente durante um período de 30 anos ou até o campo atingir o limite econômico de produção.

Tabela 4-6: Parâmetros de entrada para o modelo econômico utilizado no exemplo E-2.

Modelo	Preço do óleo (USD/m ³)	Custo da produção de água (USD/m ³)
ME-2a	314,50	6,29
ME-2b	188,70	6,29
ME-2c	251,60	6,29
ME-2d	377,40	6,29
ME-2e	440,30	6,29
ME-2f	314,50	1,57
ME-2g	314,50	3,15
ME-2h	314,50	12,58
ME-2i	314,50	25,16

A Figura 4-28 mostra um esquema para descrição do modelo geométrico de um poço genérico j , sendo $j = \{b \in N \mid 1 \leq b \leq 9\}$. O sistema proposto divide todos os poços em 24 RMP, distribuídas de forma irregular ao longo do poço, acompanhando a dimensão dos elementos na direção z , $l_{e \rightarrow z}^{r,j}$, $r = \{c \in N^* \mid c \leq 24\}$. Cada RMP ocupa apenas 1 elemento da malha de simulação, sendo que cada elemento possui dimensões diferentes. O ponto de referência para determinação das variáveis de localização da válvula, s_1 e d , é o início do poço ao entrar no reservatório e o seu valor na trajetória do poço $Prod^j$ (WT^j) é igual a 0 m. Portanto, o valor de $s_1^{i,j}$ para uma válvula i pode assumir valores diversos que dependem da posição de cada RMP e do tamanho dos elementos a montante da trajetória. Assim como para o valor de $s_1^{i,j}$, o valor de $d^{i,j}$ pode assumir diferentes valores, dependendo do tamanho dos elementos à montante da posição s_1^i , desde que $s_1^{i,j} + d^{i,j} \leq wl^j$.

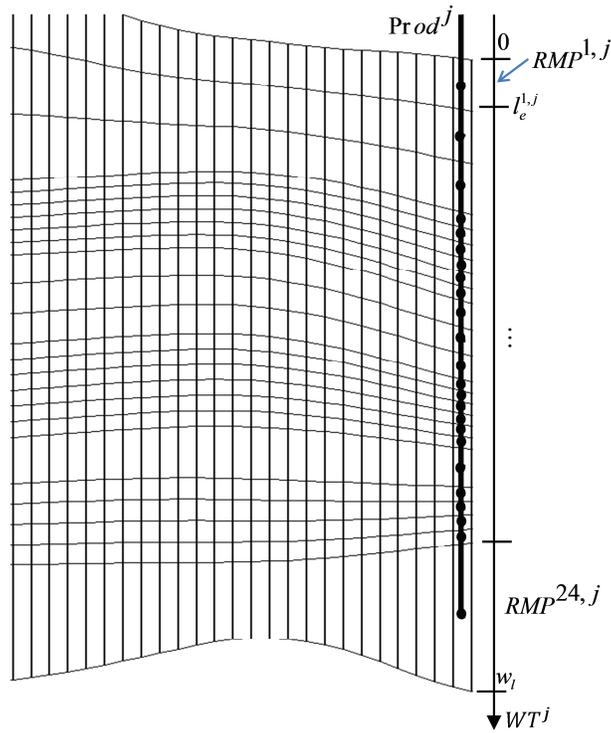


Figura 4-28: Descrição geométrica do modelo de sistema MS-2 para um poço j .

O sistema de controle definido para o exemplo E-1 também é utilizado para o exemplo E-2. Entretanto, a matriz de controle inclui a possibilidade de válvulas em diferentes poços, sendo n_w o número de poços que possuem válvulas de controle e n_v^j o número de válvulas do poço j (equação (39)).

$$\hat{W}^T = \begin{bmatrix} x^{1,1,1} & \dots & x^{30,1,1} & \dots & x^{1,n_v^1,1} & \dots & x^{30,n_v^1,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x^{1,1,n_w} & \dots & x^{30,1,1} & \dots & x^{1,n_v^1,1} & \dots & x^{30,n_v^1,1} \end{bmatrix} \quad (39)$$

4.2.2 Descrição do problema de otimização para o exemplo E-2

O problema de otimização é semelhante ao problema de otimização apresentado no exemplo E-1 com alterações apenas nos parâmetros do método de otimização. Portanto, o problema principal é encontrar por meio do uso do MOD-P o número e posição das válvulas de controle e

encontrar a melhor configuração do controle por meio do AE, com posterior correção do número das válvulas.

4.2.2.1 Problema de otimização para o MOD-P

O problema de otimização é descrito pela equação (40), sendo determinadas as variáveis de decisão: número de válvulas (n_v), posição das válvulas (\hat{v}) e controle das válvulas (\hat{w}) para a maximização do VPL do campo. O número de restrições inicial é dado por $7 \times n_w \times n_v$, porém, ao longo do processo mais restrições são inseridas à medida que as válvulas são empregadas. Assim como no exemplo E-1, n_v é dado em números naturais, o vetor \hat{v} é dado em função de valores de s_1 e d e o vetor \hat{w} são dados em função de x .

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar: } f(n_v, \hat{v}, \hat{w}), & (40) \\ &\text{Sujeito a: } g_j(\hat{u}) \leq 0; \quad j = 1, \dots, (7 \times n_w \times n_v) \\ &\quad \hat{u}^l \leq \hat{u} \leq \hat{u}^u \end{aligned}$$

Considera-se que o número de válvulas n_v é dado por (41):

$$n_v = \sum_{j=1}^{j=n_w} n_v^j, \quad (41)$$

Com base nos modelos M-2 e MS-2, as variáveis de decisão em cada poço estão submetidas a 7 restrições apresentadas nas equações a seguir (equação (42) à equação (47)).

$$g_1(\hat{u}) = n_v^j \leq 24 \quad (42)$$

$$g_1(\hat{u}) = -n_v^j \leq 0$$

$$g_2(\hat{u}) = s_1^{i,j} + d^{i,j} - wl^j \leq 0 \quad (43)$$

$$g_2(\hat{u}) = s_1^{i,j} + d^{i,j} - s_1^{i+1,j} \leq 0$$

$$g_3(\hat{u}) = x^{k+1,i,j} - x^{k,i,j} \leq 0 \quad (44)$$

$$g_4(\hat{u}) = \min(l_e^j) - d^{i,j} \leq 0 \quad (45)$$

$$g_4(\hat{u}) = d^{i,j} - (wl^j - \min(l_e^j)) \leq 0$$

$$g_6(\hat{u}) = -s_1^{i,j} \leq 0 \quad (46)$$

$$g_6(\hat{u}) = s_1^{i,j} - wl^j + l_e^{24,j} \leq 0 \quad (47)$$

$$g_7(\hat{u}) = -x^{i,j} \leq 0$$

$$g_7(\hat{u}) = x^{i,j} - 1 \leq 0$$

A função-objetivo adotada é o VPL do campo, calculado com base na equação (26).

O método para solucionar o problema de otimização do exemplo E-2 é denominado MOD-P2.

4.2.2.1 Critérios adotados para o método MOD-P

Os critérios adotados para a execução do método MOD-P são apresentados na Tabela 4-7.

Tabela 4-7: Critérios adotados para execução do método MOD-P no problema MOD-P2.

Critério	Escala	Valor
C ₁	Campo	0,10
C ₂	Campo	-0,025
	Poço	-0,05
	Região	-0,10
C ₃	Campo	0,025
	Poço	0,05
	Região	0,10
C ₄	Região	0,10
C ₅	Região	0,075

4.2.2.2 Problema de otimização para o método AE

O problema de otimização é descrito pela equação (48), determinando-se as variáveis de decisão do controle das válvulas (\hat{w}) para a maximização do VPL do campo. O vetor \hat{w} é dado em função dos valores de x .

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar: } f(\hat{w}), \\ &\text{Sujeito a: } g_j(\hat{u}) \leq 0; \quad j = 1, \dots, 3 \times n_v \\ &\quad \hat{u}^l \leq \hat{u} \leq \hat{u}^u \end{aligned} \quad (48)$$

Com base nos modelos M-2 e MS-2, cada variável de controle está submetida a 3 restrições apresentadas nas equações a seguir (equação (49) e equação (50)).

$$g_3(\hat{u}) = x^{k+1,i,j} - x^{k,i,j} \leq 0 \quad (49)$$

$$g_7(\hat{u}) = -x \leq 0 \quad (50)$$

$$g_7(\hat{u}) = x - 1 \leq 0$$

A função-objetivo adotada é o VPL do campo e ele é calculado com base na equação (26).

Este problema de otimização é executado para solucionar um problema com número de válvulas inicial igual a $n_v = 36$, sendo o número de válvulas por poço igual a $n_v^j = 4$. O número de válvulas foi escolhido com base no isolamento de 4 diferentes camadas do reservatório, o que sugere uma diferenciação do escoamento da água do reservatório entre as 4 camadas.

A Figura 4-29 mostra uma vista de uma seção vertical que cruza todo o reservatório. É possível identificar o isolamento de 4 diferentes camadas compostas por diferentes distribuições de permeabilidade e espessura. Esta diferenciação é a base para a determinação do número de válvulas consideradas por poço para aplicação do AE-2.

A primeira camada, Camada 1, é composta por uma região de permeabilidade homogênea passível de ser explorada e que ocupa no modelo de simulação os 2 ou 3 primeiros elementos da malha. Esta região é seguida por uma camada selante, com permeabilidade próxima a zero.

A Camada 2 é composta por uma região de permeabilidade mais heterogênea, onde a permeabilidade varia entre 1000 mD e 100mD, em média. Ela ocupa uma espessura menor do reservatório do que a região permeável da camada 1, porém é composta por 5 elementos de simulação na direção vertical.

A Camada 3 é a camada com maior espessura da região permeável do reservatório, sendo que é uma região intermediária do reservatório em termos de heterogeneidade na distribuição da permeabilidade. Apresenta permeabilidade média maior do que a Camada 1 e menor que a Camada 2, sendo ainda menos heterogênea que a Camada 2 e mais heterogênea que a Camada 1.

A Camada 4 possui a menor permeabilidade média para a região produtora. Além disso, é a região com menor espessura do reservatório. Portanto, o escoamento da água deve ser mais lento nesta região do que nas outras camadas.

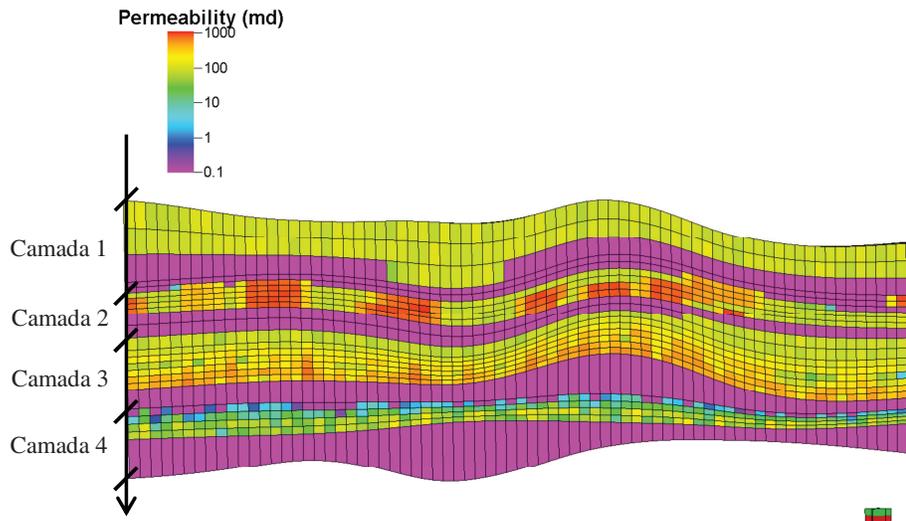


Figura 4-29: Seção vertical do modelo de reservatório MS-2 explicitando as diferentes camadas isoladas do reservatório.

Portanto, com base na análise das diferentes camadas do reservatório, optou-se por adotar inicialmente 4 válvulas de controle por poço produtor para operar as 4 diferentes camadas do reservatório. O sistema formado pela inclusão das válvulas de controle na estratégia de produção é o alvo da otimização do controle do problema denominado AE-2. A Tabela 4-8 e a Tabela 4-9 apresentam os parâmetros prefixados para os 3 problemas utilizados no exemplo E-2. As posições que isolam as regiões de influência de cada válvula são mostradas na tabela, considerando-se a posição na trajetória dos poços e também os elementos da malha de simulação.

Após a otimização via AE a avaliação da solução e a possível correção são executados utilizando os valores de $t_{\text{inf}} = t_{\text{sup}} = 2 \text{ anos}$.

Tabela 4-8: Parâmetros prefixados para execução do método AE no exemplo E-2 (Parte 1).

Problema	Poço	Válvula	s_1 (m)	d (m)	Elemento superior na direção vertical	Elemento inferior na direção vertical
AE-2	$j = 1$	$i = 1$	$s_1^{1,1} = 0$	$d^{1,1} = 9,12$	1	4
		$i = 2$	$s_1^{2,1} = 21,84$	$d^{2,1} = 15,60$	5	10
		$i = 3$	$s_1^{3,1} = 37,44$	$d^{3,1} = 33,60$	11	19
		$i = 4$	$s_1^{4,1} = 71,04$	$d^{4,1} = 14,35$	20	24
	$j = 2$	$i = 1$	$s_1^{1,2} = 0$	$d^{1,2} = 24,29$	1	4
		$i = 2$	$s_1^{2,2} = 24,29$	$d^{2,2} = 21,14$	5	10
		$i = 3$	$s_1^{3,2} = 45,43$	$d^{3,2} = 29,63$	11	19
		$i = 4$	$s_1^{4,2} = 75,06$	$d^{4,2} = 4,44$	20	24
	$j = 3$	$i = 1$	$s_1^{1,3} = 0$	$d^{1,3} = 20,70$	1	4
		$i = 2$	$s_1^{2,3} = 20,70$	$d^{2,3} = 15,02$	5	10
		$i = 3$	$s_1^{3,3} = 35,72$	$d^{3,3} = 30,97$	11	19
		$i = 4$	$s_1^{4,3} = 66,69$	$d^{4,3} = 6,72$	20	24
	$j = 4$	$i = 1$	$s_1^{1,4} = 0$	$d^{1,4} = 18,65$	1	4
		$i = 2$	$s_1^{2,4} = 18,65$	$d^{2,4} = 13,82$	5	10
		$i = 3$	$s_1^{3,4} = 32,47$	$d^{3,4} = 28,13$	11	19
		$i = 4$	$s_1^{4,4} = 60,60$	$d^{4,4} = 6,91$	20	24
	$j = 5$	$i = 1$	$s_1^{1,5} = 0$	$d^{1,5} = 19,08$	1	4
		$i = 2$	$s_1^{2,5} = 19,08$	$d^{2,5} = 16,52$	5	10
		$i = 3$	$s_1^{3,5} = 35,60$	$d^{3,5} = 31,86$	11	19
		$i = 4$	$s_1^{4,5} = 67,46$	$d^{4,5} = 13,36$	20	24
	$j = 6$	$i = 1$	$s_1^{1,6} = 0$	$d^{1,6} = 23,30$	1	4
		$i = 2$	$s_1^{2,6} = 23,30$	$d^{2,6} = 11,88$	5	10
		$i = 3$	$s_1^{3,6} = 35,18$	$d^{3,6} = 20,76$	11	19
		$i = 4$	$s_1^{4,6} = 55,94$	$d^{4,6} = 20,29$	20	24

Tabela 4-9: Parâmetros prefixados para execução do método AE no exemplo E-2 (Parte 2).

Problema	Poço	Válvula	s_1 (m)	d (m)	Elemento superior na direção vertical	Elemento inferior na direção vertical
AE-2	$j = 7$	$i = 1$	$s_1^{1,7} = 0$	$d^{1,7} = 22,28$	1	4
		$i = 2$	$s_1^{2,7} = 22,28$	$d^{2,7} = 13,25$	5	10
		$i = 3$	$s_1^{3,7} = 35,53$	$d^{3,7} = 20,98$	11	19
		$i = 4$	$s_1^{4,7} = 56,51$	$d^{4,7} = 26,75$	20	24
	$j = 8$	$i = 1$	$s_1^{1,8} = 0$	$d^{1,8} = 17,43$	1	4
		$i = 2$	$s_1^{2,8} = 17,43$	$d^{2,8} = 14,27$	5	10
		$i = 3$	$s_1^{3,8} = 31,70$	$d^{3,8} = 23,89$	11	19
		$i = 4$	$s_1^{4,8} = 55,59$	$d^{4,8} = 17,44$	20	24
	$j = 9$	$i = 1$	$s_1^{1,9} = 0$	$d^{1,9} = 10,53$	1	4
		$i = 2$	$s_1^{2,9} = 10,53$	$d^{2,9} = 14,97$	5	10
		$i = 3$	$s_1^{3,9} = 25,50$	$d^{3,9} = 27,28$	11	19
		$i = 4$	$s_1^{4,9} = 52,78$	$d^{4,9} = 7,90$	20	24

4.2.3 Árvore de derivação de casos criados para avaliação do número e posição de válvulas no exemplo E-2

A Figura 4-30 mostra a árvore de derivação com todos os casos criados para avaliar o exemplo E-2. Ao todo, 40 casos foram criados a partir dos modelos de reservatório (M-2), econômico (ME-2), do sistema criado para tomar as decisões (MS) e dos problemas de otimização (MOD-P2 e AE-2).

O primeiro nível da árvore é o modelo de reservatórios M-2, base para todos os casos. O segundo nível é dividido em 4 ramos para as diferentes características geológicas de distribuição de falhas selantes, M-2a, M-2b, M-2c, M-2d. No terceiro nível, 9 ramos são adicionados a cada ramo que chega do nível anterior, um para cada modelo econômico, ME-2a al ME-2i. No quarto nível o número de ramos é mantido, pois não há mudança na descrição do sistema MS-2. O quinto nível apresenta uma divisão para o ramo que chega do modelo econômico ME-2a, sendo um

problema de otimização para cada método de otimização. O restante dos ramos provindos dos modelos ME-2b até ME-2i apresenta apenas um novo ramo para a aplicação do método de otimização MOD-P.

Portanto, tem-se uma combinação dos 4 modelos de reservatório diferentes com os 9 modelos econômicos para este exemplo. Esta combinação gera uma ampla verificação nas quais se espera observar o comportamento do método de otimização durante a busca do número ótimo de válvulas de controle e suas posições.

Os parâmetros do método AE estão listados a seguir.

- Número de gerações: 25 gerações.
- Tamanho da população por geração: 40 indivíduos.
- Taxa de cruzamento: 0,60.
- Número de indivíduos de elite por geração: 2 indivíduos de elite.
- Taxa de mutação: 0,35.

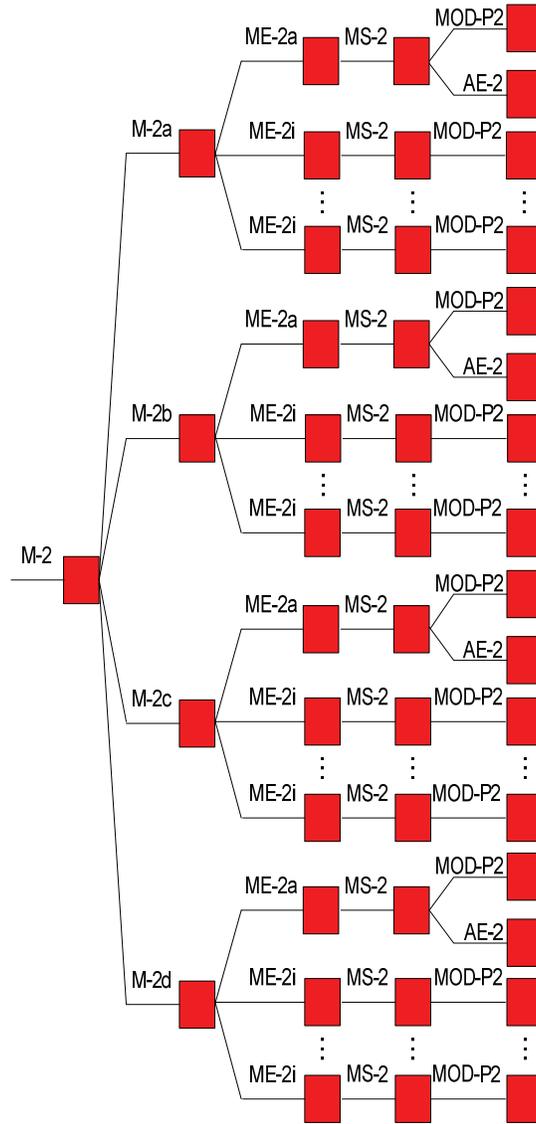


Figura 4-30: Árvore de derivação com todos os casos utilizados no exemplo E-2.

5. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nas aplicações dos exemplos E-1 e E-2. O objetivo principal das análises é mostrar a eficiência da metodologia proposta. Pretende-se demonstrar essa eficiência com base nas avaliações do desempenho dos métodos de otimização na busca da solução otimizada e mostrar os impactos causados pela inclusão de válvulas de controle na produção dos reservatórios. Portanto, aborda-se não só o aspecto matemático do método, mas também o aspecto da engenharia de reservatórios.

Os resultados estão divididos em seções para mostrar:

- resultados da comparação entre o MOD-P e o AE;
- desempenho dos métodos de otimização na busca da solução otimizada;
- impactos da otimização do número e posição de válvulas de controle no desempenho do reservatório;
- avaliação do uso dos indicadores utilizados no método MOD-P;
- avaliação da viabilidade do uso de válvulas de controle em diferentes cenários (apenas para o exemplo E-2).

5.1 Resultados do exemplo E-1

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos da aplicação dos métodos de otimização no exemplo E-1.

5.1.1 Comparação geral entre MOD-P e AE

A Tabela 5-1 mostra as soluções obtidas para os problemas propostos de otimização e outras informações gerais para auxiliar na comparação entre os dois métodos. A primeira coluna contém as variáveis do problema e os indicadores técnicos da produção. As demais colunas são separadas pelos modelos de reservatórios com uma subdivisão para separar cada um dos dois mé-

todos utilizados. A solução apresentada para o método AE é a melhor solução encontrada para os problemas AE-1a, AE-1b e AE-1c. Portanto, além de dados da função-objetivo e das variáveis de decisão, são apresentadas também informações sobre o comportamento do reservatório.

Tabela 5-1: Informações gerais sobre a otimização do exemplo E-1.

Linha	Variáveis/ Indicadores	Projeto otimizado									
		M-1a		M-1b		M-1c		M-1d		M-1e	
		MOD-P	AE	MOD-P	AE	MOD-P	AE	MOD-P	AE	MOD-P	AE
1	n_v	0	0	1	1	1	1	2	1	1	1
2	$s_1^{1,1}$ (m)	-	-	360	240	360	240	360	240	360	240
3	$d_1^{1,1}$ (m)	-	-	120	240	120	240	60	240	120	240
4	$k_{opt}^{1,1}$ (anos)	-	-	5	6	4	5	1	1	1	1
5	$s_1^{2,1}$ (m)	-	-	-	-	-	-	420	-	-	-
6	$d_1^{2,1}$ (m)	-	-	-	-	-	-	60	-	-	-
7	$k_{opt}^{2,1}$ (anos)	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-
8	Fechamento do poço (anos)	11	11	11	10	11	11	12	16	11	17
9	Número de válvulas corrigido	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
10	VPL da estratégia inicial (USD, milhões)	78,00		75,21		72,21		45,15		22,15	
11	Aumento no VPL (USD, milhões)	0	0	1,37	0,38	3,25	3,24	22,63	22,88	42,27	42,41
12	Aumento Proporcional (%)	0	0	2	1	5	5	33	34	91	91
13	Diferença entre métodos (USD, milhões)	0,00		0,99		0,01		-0,15		-0,14	
14	Diferença proporcional (%)	0		1		<1		<1		<1	
15	Simulações utilizadas	4	988	16	988	14	988	15	988	10	992
16	VPL otimizado (USD, milhões)	78,00		76,58		75,46		68,03		64,56	

Observa-se na Tabela 5-1, Linha 11, que o desempenho em relação à função-objetivo foi equivalente para ambos os métodos. A maior diferença absoluta encontrada ocorreu no caso M-1b e foi igual a aproximadamente USD 1 milhão, o que corresponde a 1% do VPL da estratégia inicial (Tabela 5-1, Linha 14). Para os outros casos, o aumento na função-objetivo obtida por cada método foi menor que USD 1 milhão, sendo a sua razão com o VPL da estratégia inicial inferior a 1%. Apesar da pouca diferença entre o VPL otimizado, o método de otimização MOD-P alcançou os melhores resultados em dois dos casos e o método AE em outros 2 casos, sendo que em 1 caso obtiveram resultado equivalente e igual a zero. Portanto, conclui-se que os valores absoluto e proporcional obtidos pelos dois métodos de otimização mostram desempenhos equivalentes da solução otimizada.

O número otimizado de válvulas de controle foi igual para os casos M-1a, M-1b, M-1c e M-1e (Tabela 5-1, Linha 9). O caso M-1d apresentou diferença de 1 válvula de controle, sendo que o MOD-P apontou 1 válvula a mais. Portanto, na maior parte dos casos os resultados apresentaram o mesmo número de válvulas. Além disso, não se pode afirmar que exista uma tendência do método MOD-P obter um maior número de válvulas de controle.

As regiões selecionadas ao longo da trajetória do poço também foram similares (Tabela 5-1, Linhas 2, 3, 5 e 6). Como esperado, os métodos identificaram a região do canal como a região com maior potencial para ser alterada. Entretanto, as respostas obtidas pelo AE indicaram em todos os casos um maior comprimento das regiões alteradas. Enquanto o método MOD-P alterou as completções correspondentes aos últimos 120 m do poço, o AE alterou as completções localizadas nos últimos 240 m. Considerando o nível de significância de 60 m para o problema de otimização MOD-P1, as opções limitadas de posição de válvulas das otimizações AE-1 e a coerência em apontar a região do canal com a região a ser alterada, conclui-se que os métodos obtiveram um resultado similar também em relação às regiões alteradas.

As Linhas 4 e 7 da Tabela 5-1 apresentam os valores otimizados para o tempo de fechamento das válvulas de controle. É importante notar que se o tempo ótimo de fechamento é igual a 0 ou igual ao tempo de fechamento do poço, a decisão é não colocar uma válvula de controle para operar a região selecionada. Considerando a região do poço delimitada pelos pontos da trajetória

do poço 360 m e 480 m, observa-se que os dois métodos de otimização apontaram valores próximos para o tempo de fechamento, com uma diferença máxima de 2 anos.

A linha 16 da Tabela 5-1 mostra que os casos com maior permeabilidade do canal tendem a apresentar um menor VPL. A diferença entre os casos extremos foi de USD 13,44 milhões, o que representa 17%. Portanto, os ganhos alcançados com a otimização não são suficientes para equiparar os VPL do caso menos heterogêneo e o mais heterogêneo, apesar de existir um aumento significativo do ganho com a otimização.

Conclui-se a partir dos resultados da Tabela 5-1 que existe uma similaridade nas respostas encontradas pelos métodos MOD-P e AE. Observa-se esta similaridade na melhora obtida na função-objetivo através da otimização, para as variáveis de decisão selecionadas, para o número e posição das válvulas, como também para os tempos de fechamento das regiões controladas por válvulas. Portanto, pode-se afirmar que os métodos produziram resultados semelhantes em diferentes aspectos da otimização.

5.1.2 Avaliação do desempenho dos métodos na busca da solução ótima

Uma avaliação do desempenho dos métodos na busca da solução otimizada aponta que os métodos de otimização melhoraram a solução do problema em até 91% (Tabela 5-1, Linha 12). Como visto anteriormente, as soluções nos 5 casos apontaram ou não a viabilidade de uso das válvulas. As soluções para os modelos M-1a, M-1d e M-1e mostram a inviabilidade do uso de válvulas, porém também apontam o fechamento de regiões do poço originalmente abertas na estratégia inicial. Apenas no caso M-1a não houve alteração da estratégia inicial. Portanto, a melhora na função-objetivo se deu pelo uso de válvulas de controle e também pela exclusão de complementações do poço.

As alterações mais restritivas foram obtidas para o caso M-1e, com a não-completação de uma parte significativa do poço. Considerando que para o modelo M-1a não houve alteração quanto à mudança nas complementações do poço, conclui-se que, quanto maior a heterogeneidade do caso, maiores são as alterações no projeto de complementações de um poço.

Observa-se que os casos extremos M-1a e M-1e apresentaram uma clara inviabilidade do uso de válvulas. Por outro lado, os casos centrais, M-1b, M-1c e M-1d, apresentaram a viabilidade

de de 1 ou 2 válvulas, dependendo do método. Portanto, a viabilidade das válvulas foi prejudicada para os casos em que o canal é pouco ou muito permeável. Isto se deve ao fato da viabilidade de excluir completações do projeto do poço quando a permeabilidade é consideravelmente elevada e a pouca influência do canal quando a permeabilidade é baixa.

Observa-se uma tendência de aumento da importância do processo de otimização com o aumento da permeabilidade do canal. Pode-se afirmar também que o uso da estratégia inicial tem seu valor significativamente reduzido com o aumento da permeabilidade do canal. Portanto, este resultado corrobora com a tese de que modelos mais heterogêneos requerem maior esforço no projeto das completações do poço por meio de otimização, sejam elas com a inclusão de válvulas de controle ou não.

Da Figura 5-1 à Figura 5-5, mostra-se a evolução do processo de otimização para todos os casos utilizados. No eixo das ordenadas está o VPL das soluções testadas deduzido do VPL da estratégia inicial. No eixo principal das abscissas está o número das simulações por ordem de execução dentro do método AE, seguindo a sequência AE-1a, AE-1b e AE-1c. No eixo secundário das abscissas está o número das simulações por ordem de execução do método MOD-P. A legenda mostra os 4 problemas de otimização propostos, sendo que as séries de dados AE-1a*, AE-1b* e AE-1c* são referentes às simulações realizadas na correção do método AE.

Em geral, observa-se que o método AE apresentou grande diversidade de soluções e conseguiu melhorar gradativamente a solução ao longo das gerações. Porém, os casos M-1d e M-1e mostram que as correções para o número de válvulas são importantes e ajudam a melhorar a solução, modificando o número e a posição de válvulas. Portanto, pode-se afirmar que o método AE obteve boas soluções para o controle das válvulas do problema de otimização da estratégia inicial, mas que a correção do número de válvulas é importante e pode levar a acréscimos significativos da função-objetivo.

O método MOD-P atingiu o critério de parada de forma rápida, sendo o número máximo de simulações utilizadas igual a 16, para a solução do caso M-1b (Figura 5-2), e o número mínimo igual a 4, para a solução do caso M-1a (Figura 5-1). Como pode ser observado na Figura 5-1, algumas simulações foram realizadas sem apresentar nenhum ganho, apenas para teste da região.

Entretanto, o total de simulações realizadas foi relativamente baixo, evitando dezenas de simulações para resolver um caso simples.

A análise dos dados gerados pelo AE mostra que houve uma relevante dispersão da função-objetivo. Indivíduos com o VPL bem abaixo do ótimo foram simulados em todos os 5 casos testados. Isto mostra que o algoritmo evolucionário pode utilizar simulações avaliando regiões do espaço de busca que são pouco significativas para a solução do problema. Portanto, permitir a geração de indivíduos de forma aleatória ou sem critérios com base na engenharia e em operações mais realísticas pode levar os métodos de otimização a uma análise mais demorada.

Por outro lado, o método MOD-P apresenta uma dispersão menor das soluções avaliadas. Além disso, a dispersão torna-se ainda menor quando a série é analisada considerando cada ciclo do método, analisando-se apenas os pontos gerados após a inclusão de uma válvula. Por exemplo, na Figura 5-4, observa-se que existe uma diferença entre os pontos gerados antes da simulação número 6 e depois desta simulação. Após a simulação número 6, os VPL gerados mantiveram-se menos dispersos do que quando se compara toda a série de dados. Portanto, o método MOD-P apresentou uma característica de tendência à redução da dispersão do VPL com a evolução do método. Esta característica mostra que o método tende a encontrar melhores respostas sem se desviar de forma significativa do trajeto rumo ao valor ótimo.

Observa-se ainda que, em geral, a maior diferença entre o pior e o melhor indivíduo das séries ocorreu no problema AE-1a, sendo seguido pelo caso AE-1b e AE-1c, respectivamente. Este resultado indica que quanto maior o número de válvulas menor a dispersão das soluções encontradas e, portanto, menos sensível a alterações está o problema.

Considerando a Figura 5-1, percebe-se pelos resultados do método AE que o aumento do número de válvulas prejudicou significativamente a função-objetivo, em termos proporcionais ao VPL da estratégia inicial. Entretanto, a Figura 5-5 mostra que para o caso M-1e esta diferença proporcional é menor e que a opção de ter mais válvulas se aproxima da opção ótima, que neste caso foi não ter válvulas. Portanto, quanto maior a heterogeneidade do canal, maior é a proximidade proporcional entre as opções com diferentes números de válvulas.

Para o caso AE-1a, a solução não evoluiu ao longo das gerações permanecendo igual desde a geração inicial e sendo que o melhor indivíduo foi o indivíduo potencial. Este resultado eviden-

cia que para o caso M-1a, a melhor opção foi manter as regiões do poço abertas até atingir o seu limite econômico. Portanto, reagir ao fluxo de caixa líquido negativo foi a melhor opção para o caso com menor heterogeneidade. Por outro lado, observa-se que o fechamento proativo com base na data em que se atingiria o limite econômico foi sendo mais significativo com o aumento da permeabilidade do canal.

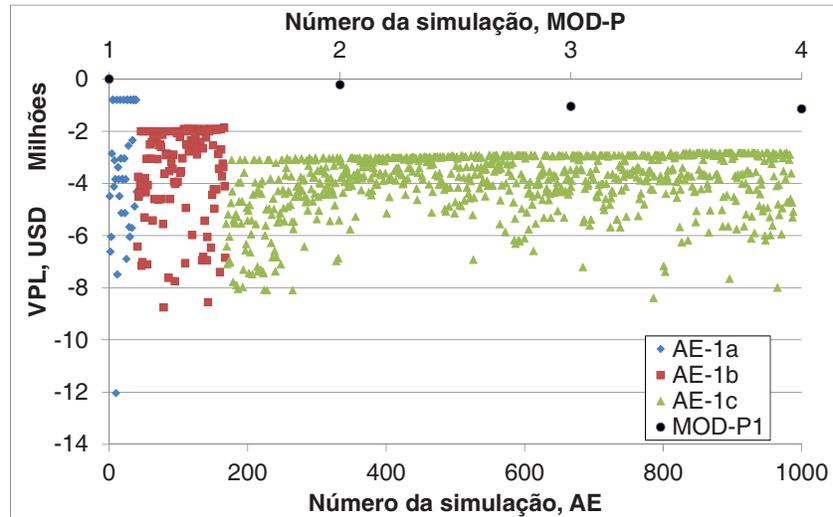


Figura 5-1: Evolução dos métodos MOD-P (eixo superior) e AE (eixo inferior) na busca da solução ótima para o caso M-1a.

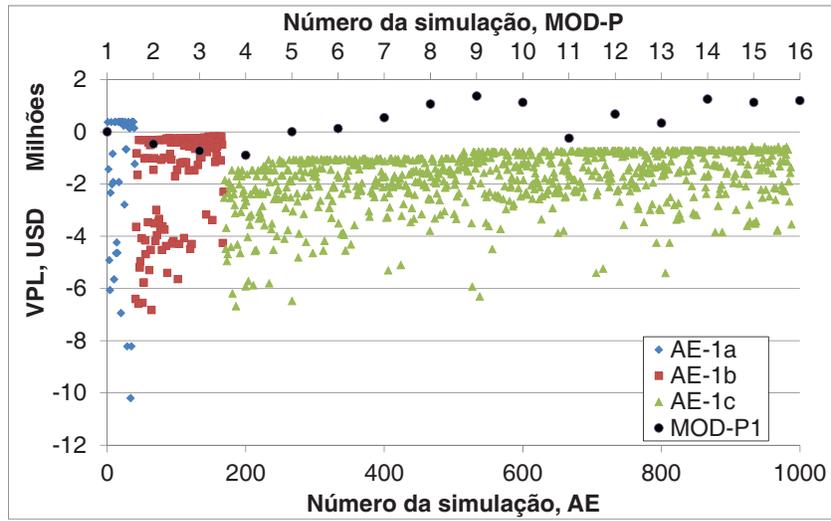


Figura 5-2: Evolução dos métodos MOD-P (eixo superior) e AE (eixo inferior) na busca da solução ótima para o caso M-1b.

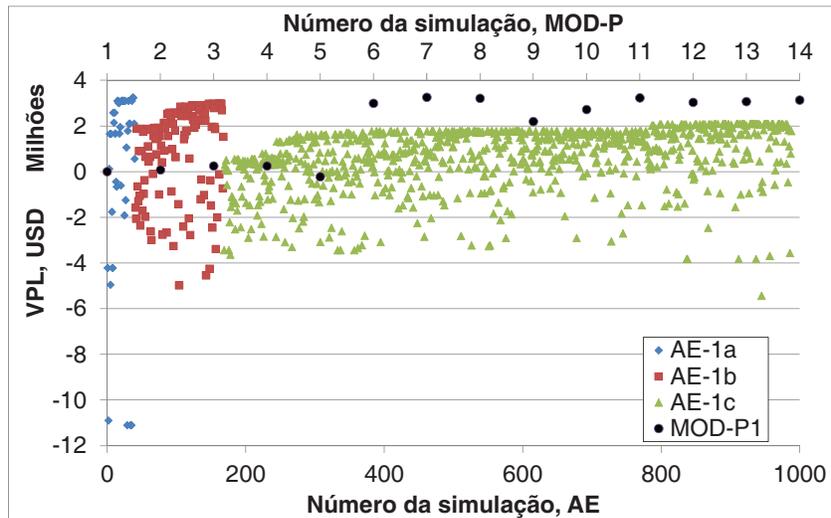


Figura 5-3: Evolução dos métodos MOD-P (eixo superior) e AE (eixo inferior) na busca da solução ótima para o caso M-1c.

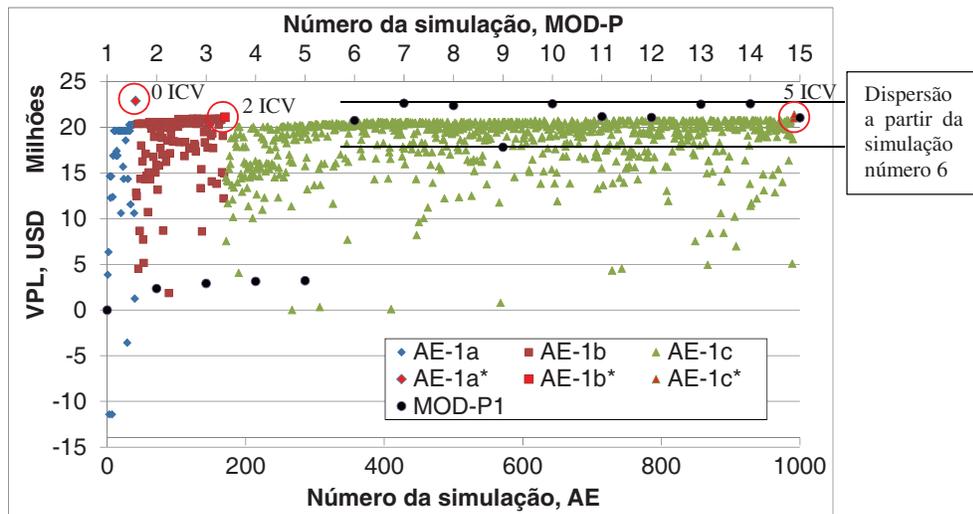


Figura 5-4: Evolução dos métodos MOD-P (eixo superior) e AE (eixo inferior) na busca da solução ótima para o caso M-1d.

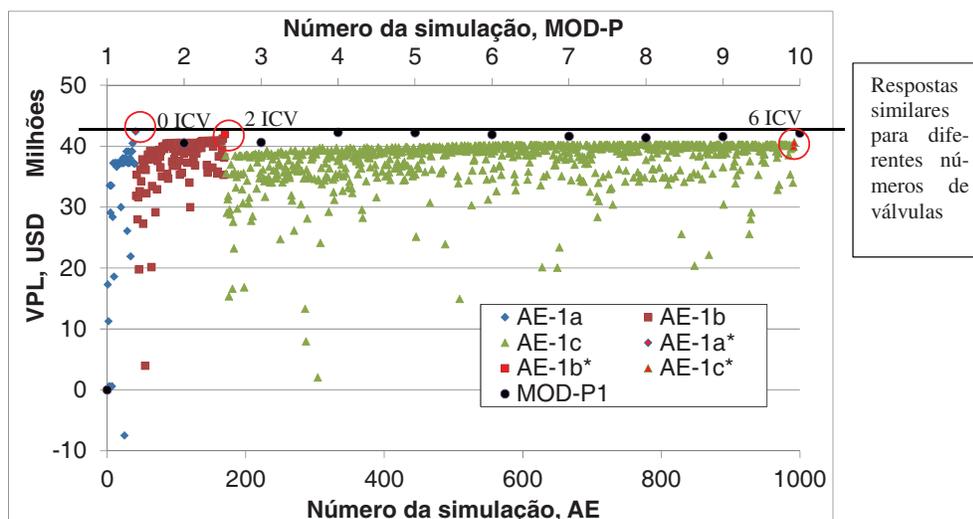


Figura 5-5: Evolução dos métodos MOD-P (eixo superior) e AE (eixo inferior) na busca da solução ótima para o caso M-1e.

A Tabela 5-2 a Tabela 5-6 mostram as variáveis utilizadas em cada simulação e a função-objetivo obtida pela avaliação econômica. O objetivo dessas tabelas é apresentar como o método MOD-P percorreu o espaço de solução para alcançar a solução ótima e discutir as ações tomadas pelo método. A primeira coluna indica o número da simulação por ordem de execução. A segun-

da e a terceira coluna indicam as variáveis do processo, o tempo, dado pelo índice k relativo a t^k , e a posição, dada pela RMP que foi utilizada. A última coluna indica o VPL calculado para a simulação descontado do VPL da estratégia inicial. As simulações que indicaram viabilidade e correspondem ao tempo ótimo de fechamento estão destacadas em vermelho.

A Tabela 5-2 mostra a evolução do MOD-P para o caso M-1a. Observa-se que as 4 simulações testaram o fechamento de regiões entre os tempos $k=6$ e $k=8$, que é a parte entre o meio e o final da vida útil do poço, que foi de 11 anos. Portanto, o método não testou alternativas no início da produção.

Em relação às regiões avaliadas, o método testou apenas as regiões $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$, que são as regiões cruzadas pelo canal. Entretanto, observa-se que, quando o método testou as regiões $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ em conjunto, os resultados foram melhores, embora não o suficiente para melhorar o VPL. Portanto, método focou nas regiões mais próximas ao canal com início dos testes a partir do meio da vida útil do campo, não sendo constatada a viabilidade das válvulas.

Tabela 5-2: Variáveis utilizadas e função-objetivo obtida no processo de otimização do caso M-1a.

Número da simulação	k	Regiões testadas	VPL, USD (Milhões)
1	-	Estratégia inicial	0
2	6	$RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$	-0,21
3	7	$RMP^{7,1}$	-1,05
4	8	$RMP^{7,1}$	-1,14

A Tabela 5-3 apresenta os dados relativos ao caso M-1b. Assim como para o caso M-1a, o método indicou a potencialidade da aplicação de válvulas a partir do tempo $t^{k=6}$, porém fez uma análise isolada da região $RMP^{7,1}$. O teste não gerou resultados positivos, mas continuou verificando a mesma opção de região até o tempo $t^{k=9}$, quando testou a opção de fechar as regiões $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$. Esta opção gerou resultados positivos e o tempo ótimo encontrado foi em $k=5$. Portanto, o método utilizou 3 simulações com testes da região $RMP^{7,1}$ de forma isolada, o que não gerou resultados positivos. Caso a opção fosse testar as regiões $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ combinadas desde o início, o método teria chegado ao melhor resultado de forma mais rápida.

Tabela 5-3: Variáveis utilizadas e função-objetivo obtida no processo de otimização do caso M-1b.

Número da simulação	k	Regiões testadas	VPL, USD (Milhões)
1	-	Caso base	0
2	6	$RMP^{7,1}$	-0,46
3	7	$RMP^{7,1}$	-0,73
4	8	$RMP^{7,1}$	-0,90
5	9	$RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$	0,04
6	8	$RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$	0,12
7	7	$RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$	0,54
8	6	$RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$	1,07
9	5	$RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$	1,37
10	4	$RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$	1,13
11	10	$RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$	-0,24
12	6	$RMP^{6,1}$	0,68
13	7	$RMP^{5,1}$ e $RMP^{6,1}$	0,33
14	8	$RMP^{5,1}$	1,25
15	9	$RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$	1,13
16	10	$RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$	1,20

O método prosseguiu fazendo testes nas regiões $RMP^{4,1}$, $RMP^{5,1}$ e $RMP^{6,1}$. Apesar da região $RMP^{6,1}$ ser a região seguinte com maior potencial teórico de ser fechada, já que é a região que continua aberta mais próxima do canal, o método testou 3 alternativas considerando a região $RMP^{6,1}$ aberta e fechando as regiões $RMP^{6,1}$ e $RMP^{5,1}$. Portanto, para este caso em especial, as simulações 14, 15 e 16 poderiam ser dispensadas, em teoria.

Tabela 5-4 mostra que a potencialidade para aplicação das válvulas para o caso M-1c foi indicada mais cedo que nos casos anteriores, no tempo correspondente à $k = 5$. O tempo ótimo de fechamento para a região $RMP^{7,1}$ foi identificado já no tempo $t^{k=4}$. Entretanto, foi identificada também a potencialidade para fechamento da região $RMP^{8,1}$ no tempo $t^{k=4}$, o que indica que, para este caso, um caminho mais curto poderia ter sido agregar as duas regiões desde o início. Observa-se também que do tempo correspondente à $k = 3$ até $k = 10$ todos os valores possíveis foram testados para pelo menos uma RMP .

Tabela 5-4: Variáveis utilizadas e função-objetivo obtida no processo de otimização do caso M-1c.

Número da simulação	k	Regiões testadas	VPL, USD (Milhões)
1	-	Caso base	0
2	5	$RMP^{7,1}$	0,08
3	4	$RMP^{7,1}$	0,25
4	3	$RMP^{7,1}$	0,24
5	6	$RMP^{7,1}$	-0,22
6	5	$RMP^{8,1}$	2,99
7	4	$RMP^{8,1}$	3,25
8	3	$RMP^{8,1}$	3,21
9	6	$RMP^{8,1}$	2,19
10	6	$RMP^{6,1}$	2,72
11	7	$RMP^{5,1}$	3,22
12	8	$RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$	3,03
13	9	$RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$	3,06
14	10	$RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$	3,13

Assim como no caso M-1b, o MOD-P fez testes para verificar a viabilidade de fechamento das regiões $RMP^{4,1}$, $RMP^{5,1}$ e $RMP^{6,1}$. Não foi identificada a viabilidade para aplicação nestas regiões. Além disso, as regiões $RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$ também foram testadas, sem que fosse identificada viabilidade de aplicação de válvulas de controle na região $RMP^{6,1}$.

Entretanto, observa-se pela comparação entre as simulações 10 e 11 que o fechamento da região $RMP^{5,1}$ no tempo correspondente à $k = 7$ gerou um melhor VPL do que o fechamento da $RMP^{6,1}$ no tempo $k = 6$. Este resultado mostra que, em certos casos, mesmo regiões mais distantes do canal podem ter um maior potencial para fechamento de regiões do poço do que algumas regiões mais próximas.

Portanto, o método iniciou os testes em um tempo próximo ao tempo ótimo e restringiu as buscas iniciais às regiões que se mostraram realmente com maior potencial para aplicação de válvulas de controle. Entretanto, o método poderia ter seguido um caminho mais rápido caso os indicadores apontassem a combinação das regiões $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ nas primeiras simulações.

A Tabela 5-5 mostra os dados obtidos na otimização do caso M-1d. Os testes iniciaram a partir do tempo correspondente à $k = 4$. Comparando com os casos anteriores, isto corrobora o fato que o método MOD-P age mais rapidamente quanto mais cedo a água influencia negativamente no poço. Embora não seja possível identificar a não completção do poço com os indicadores utilizados já na primeira simulação, foram utilizadas 4 simulações para identificar o fechamento ótimo da região $RMP^{7,1}$. Para este caso, todos os tempos possíveis foram testados para pelo menos 1 RMP .

Tabela 5-5: Variáveis utilizadas e função-objetivo obtida no processo de otimização do caso M-1d.

Número da simulação	k	Regiões testadas	VPL, USD (Milhões)
1	-	Caso base	0,00
2	4	$RMP^{7,1}$	2,36
3	3	$RMP^{7,1}$	2,91
4	2	$RMP^{7,1}$	3,14
5	1	$RMP^{7,1}$	3,22
6	4	$RMP^{8,1}$	20,74
7	3	$RMP^{8,1}$	22,63
8	2	$RMP^{8,1}$	22,38
9	5	$RMP^{8,1}$	17,82
10	5	$RMP^{6,1}$	22,58
11	6	$RMP^{5,1}$	21,16
12	7	$RMP^{5,1}$	21,08
13	8	$RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$	22,52
14	9	$RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$	22,58
15	10	$RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$	21,04

Os resultados apontam que a separação entre as regiões $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ foi a solução otimizada alcançada pelo MOD-P. Assim, como nos outros casos, a região $RMP^{7,1}$ foi a região com maior potencial, seguida pela região $RMP^{8,1}$. Foram executadas 9 simulações para identificar o fechamento ótimo das duas regiões. Depois disso, mais 6 simulações foram executadas para avaliar outras regiões.

Observa-se, nas simulações 10 e 14, que o fechamento das regiões obteve um resultado bem parecido com o ótimo, apenas USD 0,05 milhões. Portanto, apesar da solução ter sido o fechamento das regiões $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$, outras soluções tiveram um valor equivalente ou próximo à solução otimizada.

Na Tabela 5-6, observa-se que o valor inicial para o fechamento das regiões foi menor para o caso M-1e do que para os outros casos, $t^{k=3}$. Isto significa que o método foi capaz de acompanhar o aumento da permeabilidade entre os casos e identificar o fechamento mais precoce de regiões para os casos onde era esperado esse comportamento. Os números em vermelho indicam que essas simulações apresentaram uma estratégia que inclui uma válvula de controle com o tempo de fechamento ótimo.

Tabela 5-6: Variáveis utilizadas e função-objetivo obtida no processo de otimização do caso M-1e.

Número da simulação	k	Regiões testadas	VPL, USD (Milhões)
1	-	Caso base	0,00
2	3	$RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$	40,52
3	2	$RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$	40,62
4	1	$RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$	42,27
5	5	$RMP^{6,1}$	42,23
6	6	$RMP^{5,1}$	41,90
7	7	$RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$	41,63
8	8	$RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$	41,39
9	9	$RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$	41,59
10	10	$RMP^{3,1}$, $RMP^{4,1}$, $RMP^{5,1}$ e $RMP^{6,1}$	42,15

Como a solução indica a não completção das regiões $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$, foram necessárias 3 simulações para decidir sobre essas variáveis. Todos os tempos possíveis, exceto para $k = 4$, também foram testados com pelo menos 1 RMP . Porém, apenas essas duas regiões foram alteradas na solução otimizada.

Após o fechamento das regiões $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$, o método testou o fechamento da região $RMP^{6,1}$ na simulação 5. Esta alternativa gerou uma solução próxima à solução otimizada, assim

como o fechamento combinado das regiões $RMP^{3,1}$, $RMP^{4,1}$, $RMP^{5,1}$ e $RMP^{6,1}$, simulação 10. Outros testes foram executados com as regiões $RMP^{4,1}$ e $RMP^{5,1}$. Entretanto, os testes geraram resultados piores.

Portanto, o método apresentou características coerentes com o que se esperava na busca da solução otimizada, avaliando regiões realmente com maior potencial e iniciando as buscas em relação a um tempo próximo ao otimizado. Entretanto, algumas simulações foram realizadas em casos em que se poderiam combinar duas regiões diretamente ou avaliaram-se regiões com menor potencial do que outras, em teoria. Mesmo assim, o método MOD-P mostrou-se eficiente na busca da solução otimizada.

5.1.3 Impactos da otimização do número e da posição das válvulas de controle no desempenho do reservatório

Nesta seção, são apresentados resultados que mostram o impacto da otimização no desempenho da produção e na economia do campo, apresentando as diferenças na produção do reservatório para os casos avaliados no exemplo E-1. Inicialmente, uma avaliação geral do impacto em indicadores de longo prazo é apresentada. Em seguida, mostra-se o impacto na produção ao longo do tempo. Com isso, pretende-se avaliar como a inclusão de uma otimização de número e da posição de válvulas de controle pode afetar os indicadores e as decisões tomadas no projeto. Além disso, esta análise auxilia no entendimento da eficiência do processo de otimização.

A Tabela 5-7 mostra os indicadores de longo prazo para produção e economia do exemplo E-1. As linhas estão distribuídas para apresentar os dados por caso, enquanto que as colunas estão distribuídas por indicador do campo. A coluna do VPL apresenta o VPL otimizado de cada problema descontado do VPL da estratégia inicial de cada caso. As colunas com a variação dos indicadores de produção tem como referência a variação dos resultados gerados pela estratégia inicial e a estratégia que gerou o melhor VPL, considerando os resultados obtidos pelo MOD-P1 e o AE-1.

Tabela 5-7: Indicadores técnicos e econômicos das soluções otimizadas para o exemplo E-1.

Caso	Problema	Produção total de óleo, milhões std m ³	Variação da produção total de óleo (%)	Produção total de água, milhões std m ³	Variação da produção total de água (%)	Investimento em válvulas, milhões USD	VPL, milhões USD
M-1a	Base	4,10	-	2,58	-	0,00	0,00
	MOD-P1	4,10	0,00	2,58	0,00	0,00	0,00
	AE-1	4,10	0,00	2,58	0,00	0,00	0,00
M-1b	Base	4,05	-	2,67	-	0,00	0,00
	MOD-P1	4,06	0,25	2,58	-3,37	1,00	1,37
	AE-1	3,98	-1,73	1,46	-45,32	1,00	0,38
M-1c	Base	4,00	-	2,75	-	0,00	0,00
	MOD-P1	4,03	0,75	2,62	-4,73	1,00	3,25
	AE-1	4,02	0,50	2,73	-0,73	1,00	3,24
M-1d	Base	3,97	-	5,03	-	0,00	0,00
	MOD-P1	4,00	0,76	3,40	-32,41	1,00	22,63
	AE-1	3,95	-0,50	2,96	-41,15	0,00	22,88
M-1e	Base	3,99	-	7,95	-	0,00	0,00
	MOD-P1	3,90	-2,26	2,81	-64,65	0,00	42,27
	AE-1	3,86	-3,26	2,47	-68,93	0,00	42,41

Observa-se na Tabela 5-7 que a produção total de óleo teve uma pequena variação entre os problemas de cada caso, no máximo -3,26% para o caso M-1e. Os resultados mostram que a inclusão de válvulas de controle nos casos M-1b, M-1c e M-1d geraram estratégias que diminuíram ou também aumentaram a produção de óleo. Nos casos em que houve apenas um fechamento de regiões do poço, a estratégia otimizada apresentou uma redução na produção total de óleo. Portanto, os resultados otimizados apontam para pequenas alterações nos valores finais da produção de óleo, que foram obtidos por estratégias que aumentaram ou reduziram a produção de óleo.

Por outro lado, a produção total de água sofreu um impacto maior do que a produção de óleo após o processo de otimização. Observa-se um valor de até 68,93% de redução da quantidade de água produzida entre a estratégia otimizada e a estratégia inicial. Todas as otimizações geraram estratégias que reduziram a produção total de água. Com exceção do caso M-1b otimizado pelo AE-1, percebe-se uma tendência no aumento da redução de água para os casos com maior permeabilidade do canal. Portanto, a otimização para inclusão de válvulas de controle impacta de forma significativa nos indicadores de produção de água do campo.

A Figura 5-6 mostra os dados dos indicadores de produção para as melhores estratégias de cada problema e sua relação com a permeabilidade do canal. Observa-se que o volume de óleo tende a diminuir com o aumento da permeabilidade do canal. Em relação à produção de água, observa-se que houve uma tendência de incremento na produção de água com o aumento da permeabilidade do canal até o caso M-1d. Porém, a estratégia otimizada do caso M-1e reduziu de forma significativa a produção de água, devido ao fechamento de uma região significativa do poço.

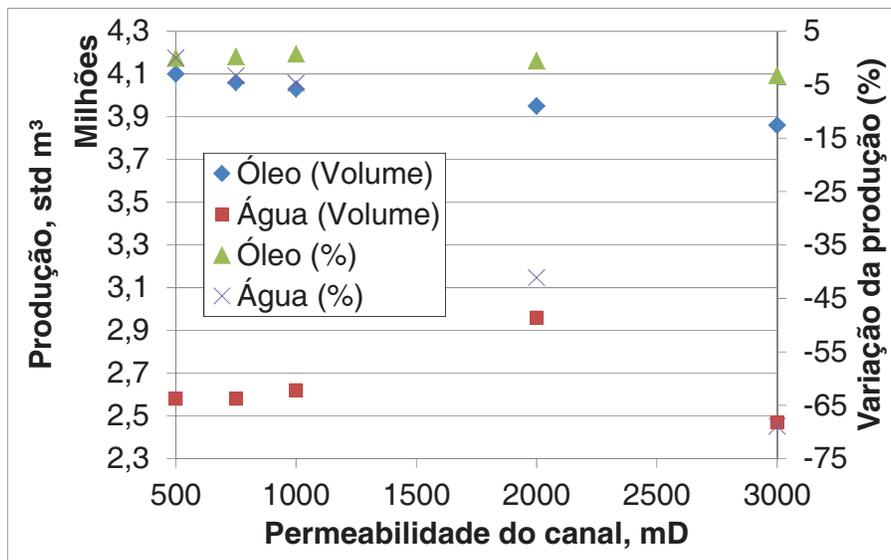


Figura 5-6: Indicadores de produção de longo prazo dos problemas otimizados associados às permeabilidades do canal de cada caso.

As análises das variações da produção entre as estratégias otimizadas e a estratégia inicial mostram que houve uma pequena variação positiva nos casos com menor permeabilidade do canal, 750 mD e 1000 mD, mas houve variação negativa para os casos com maior permeabilidade. Em relação à produção de água, os resultados mostram que quanto maior a permeabilidade do canal, maior foi a redução da produção de água.

Em conclusão, os resultados dos indicadores de longo prazo, mostram que, em geral, os casos otimizados geraram estratégias com volumes similares de produção de água e óleo. Entretanto, houve alguns casos em que as variações na produção de óleo tiveram tendências diferentes, como nos casos M-1b e M-1d. Nota-se que é possível obter ganhos semelhantes utilizando estratégias diferentes de produção, como reduzir um pouco a produção de óleo para reduzir de forma

mais significativa a produção de água ou aumentar a produção de óleo, sem impactar muito na produção total de água.

A Figura 5-7 à Figura 5-11 mostram a relação entre o volume de óleo produzido e o VPL de todas as estratégias testadas nas otimizações feitas no exemplo E-1 descontado do valor de cada estratégia inicial correspondente a cada caso. O objetivo destas figuras é mostrar como os métodos buscaram alternativas para encontrar a solução otimizada. Por meio do traçado de fronteiras aparentes ^[1], observa-se se os métodos de otimização foram eficientes na busca da solução ótima e se o desempenho do MOD-P alcançou os objetivos definidos para o método. As séries denominadas AE-1a*, AE-1b* e AE-1c* são referentes à correção aplicada aos respectivos problemas.

Percebe-se nas Figura 5-7 à Figura 5-11 que os métodos abrangeram um grande número de alternativas com diferentes produções totais de óleo. Observa-se também que os casos otimizados pelo método MOD-P e AE convergiram para um mesmo valor aproximado de recuperação de óleo. Portanto, a união das soluções dos métodos de otimização explorou de forma exaustiva o espaço de solução do problema e sugeriram estratégias semelhantes quanto à recuperação final de óleo.

Observa-se que a dispersão das alternativas avaliadas pelo método MOD-P é relativamente pequena quando comparadas a todas as alternativas testadas. Os valores de recuperação de óleo são concentrados em uma faixa próxima ao valor otimizado, com exceção da solução da estratégia inicial. Portanto, os indicadores foram eficientes na limitação das variáveis de decisão para obter estratégias com valores próximos ao ótimo.

Observando a Figura 5-7 e supondo que existe uma fronteira com comportamento suave e que representa as opções de produção de volume de óleo e o seu respectivo VPL, nota-se que as fronteiras aparentes dos problemas AE-1b e AE-1c estão bem representadas, enquanto que a fronteira do problema AE-1a possui regiões na fronteira que não estão preenchidas com alternativas. Este resultado é um indicador de que para o problema AE-1a o método de otimização não explorou de forma exaustiva o espaço de solução. Neste problema, o método buscou alternativas de

^[1] Uma fronteira aparente é aqui definida como uma curva suave formada por um conjunto de alternativas avaliadas cujos seus valores encontram-se na fronteira gráfica de um espaço de solução bidimensional formado por dois indicadores. O termo aparente é utilizado para identificar que a fronteira não necessariamente corresponde à fronteira do espaço de solução completo, mas apenas das alternativas avaliadas em cada caso.

forma mais intensa em regiões do espaço de busca mais longe das regiões da solução otimizada. Entretanto, observa-se que o ponto de máximo obtido no problema AE-1a está próximo do melhor resultado obtido pelo método MOD-P, em termos de produção de óleo e VPL.

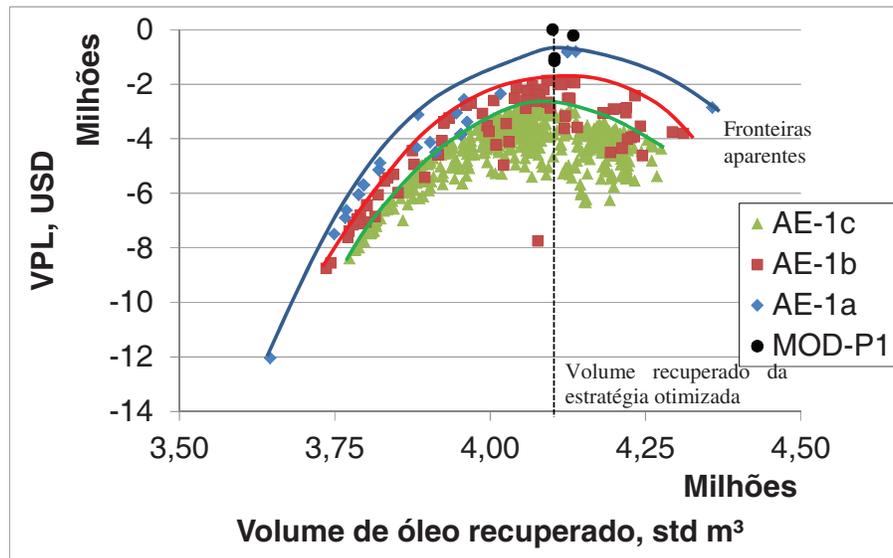


Figura 5-7: Relação entre volume de óleo recuperado e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1a.

Observa-se também que o VPL ótimo encontrado nos 3 problemas propostos está associado a um volume recuperado próximo ao obtido pela estratégia inicial, 4,10 milhões de m³. Este resultado mostra que o aumento no número de válvulas não afetou a produção de óleo de forma significativa. Além disso, considerando a mesma produção total de óleo, as opções do problema AE-1a foram superiores em todos os casos simulados.

O método MOD-P fez alterações na estratégia base que não alteraram de forma significativa a produção total de óleo. Portanto, considera-se que, para o caso M-1a o método MOD-P foi eficiente na busca de soluções próximas à solução ótima.

A Figura 5-8 mostra que as fronteiras aparentes traçadas para os problemas AE-1 do caso M-1b foram bem delimitadas por pontos gerados pelas simulações. Observa-se que, assim como no caso M-1a, as alternativas geradas para o problema AE-1a apresentam melhores VPL para um mesmo valor de óleo recuperado. Entretanto, para casos com menores produções totais de óleo, as alternativas dos problemas AE-1a e AE-1b tornam-se mais próximas.

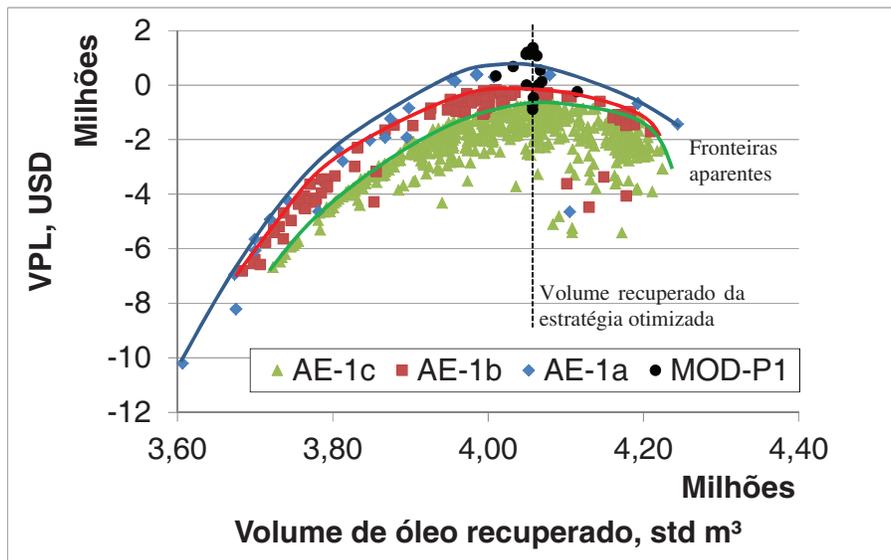


Figura 5-8: Relação entre volume de óleo recuperado e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1b.

O método MOD-P apresentou baixa dispersão do valor de volume de óleo recuperado, comparado com o método AE. As alternativas se concentraram na região do espaço de solução próxima ao valor ótimo encontrado. Portanto, assim como no caso M-1a, o uso dos indicadores auxiliou de forma a manter as buscas próximas ao volume de óleo recuperado da melhor alternativa. Apesar disso, o método MOD-P testou algumas alternativas com VPL pior que o VPL da estratégia inicial.

Observa-se que a linha traçada para as estratégias com o mesmo volume recuperado de óleo da estratégia ótima mostra que os pontos de máximo das curvas de fronteira aparente não apresentam o mesmo volume recuperado de óleo. Para o problema AE-1b o volume de óleo foi menor, enquanto para o problema AE-1c foi maior. Pode-se concluir que não houve uma correlação entre o número otimizado de válvulas e o volume de óleo recuperado.

A Figura 5-9 apresenta os resultados correspondentes ao caso M-1c. Observa-se pelas fronteiras aparentes que para o problema AE-1a não foram geradas alternativas na fronteira entre a região de 3,80 e 4,00 milhões de m³ de óleo recuperado. Portanto, este problema não teve sua fronteira claramente definida, mas apresentou alternativas próximas à solução ótima encontrada. Para os problemas AE-1b e AE-1c observa-se uma boa delimitação das fronteiras.

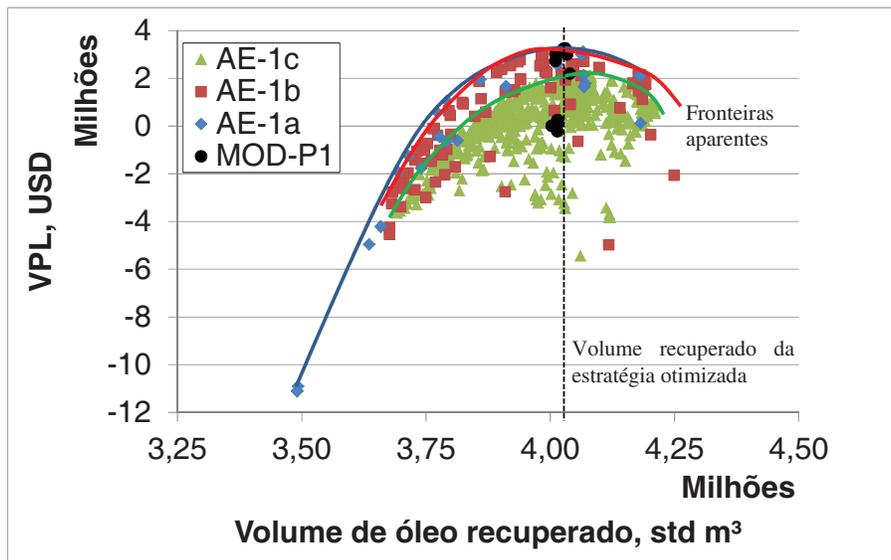


Figura 5-9: Relação entre volume de óleo recuperado e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1c.

Para este caso, nota-se que as fronteiras entre o problema AE-1a e AE-1b apresentam soluções com VPL semelhantes nas regiões próximas a região da solução ótima. Pode-se concluir que a alternativa de ter mais que uma válvula, começa a se aproximar da alternativa de usar apenas uma válvula. Entretanto, o problema AE-1c apresenta desempenho inferior por toda a região avaliada.

Todas as alternativas avaliadas pelo método MOD-P obtiveram valores próximos de óleo recuperado, com baixa dispersão (Figura 5-9). Além disso, o valor de óleo recuperado encontra-se relativamente próximo do valor recuperado pela estratégia inicial, uma diferença de 0,03 milhões de m³. Portanto, o método MOD-P apresentou uma boa eficiência na seleção das alternativas avaliadas.

A Figura 5-10 mostra que a delimitação da curva de fronteira aparente para o problema AE-1a não teve alternativas avaliadas com recuperação total de óleo entre 3,65 e 3,95 milhões de m³. Observa-se uma melhor delimitação da fronteira para os problemas AE-1b e AE-1c. Entretanto, assim como nos casos anteriores, a otimização do problema alcançou uma solução próxima à solução ótima encontrada nos outros problemas, sem considerar a correção.

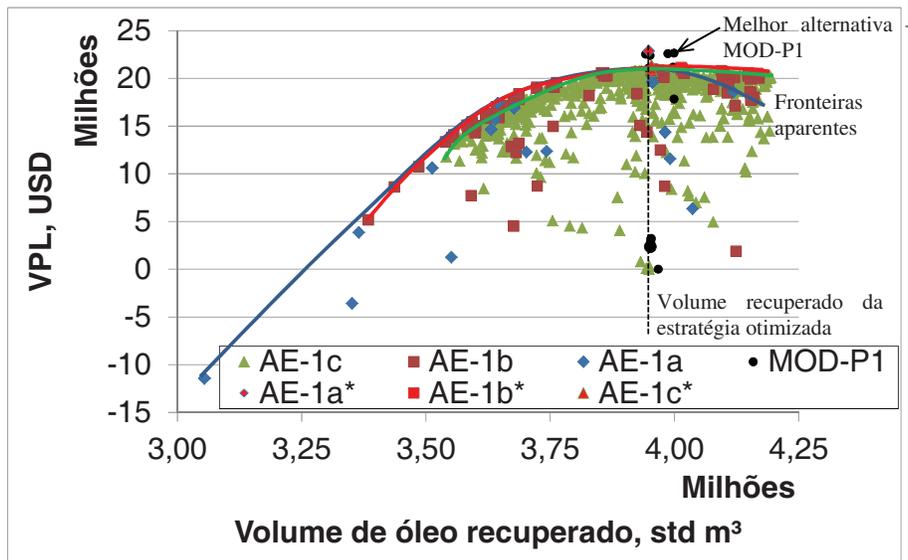


Figura 5-10: Relação entre volume de óleo recuperado e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1d.

Observa-se pelas fronteiras dos problemas AE-1b e AE-1c que a alternativa de ter mais válvulas conseguiu melhores desempenho para volumes recuperados de óleo mais elevados. Observa-se também, que a inclinação das curvas de fronteira para os casos AE-1b e AE-1c é mais suave, o que indica que para este cenário, as alternativas de recuperar mais óleo utilizando mais válvulas são mais semelhantes à alternativa ótima.

A correção do problema AE-1a gerou uma alternativa superior em termos de VPL e com valores aproximados de volume de óleo recuperado. Portanto, a retirada de uma válvula do problema AE-1a não modificou de forma significativa a recuperação de óleo, mas a desconsideração do investimento provocou uma significativa descontinuidade para o VPL. O método MOD-P apresentou baixa dispersão para os valores de volume de óleo recuperado. Porém, a melhor alternativa apresentou 50 mil m³ a mais de óleo que a melhor alternativa encontrada pela correção do problema AE-1a. Entretanto, algumas alternativas apresentaram o mesmo volume de óleo recuperado e com um VPL USD 200.000,00 menor que a solução otimizada encontrada pelo MOD-P. Este resultado indica que, para este caso, as soluções apresentaram alternativas com VPL semelhantes ao do VPL ótimo encontrado, mas com recuperação de óleo diferente.

A Figura 5-11 mostra que, para o caso M-1e, foi possível traçar as fronteiras do espaço de solução avaliado. Observa-se que entre os volumes recuperados de óleo 3,5 milhões de m³ e 4 milhões de m³, as fronteiras aparentes dos problemas AE-1a, AE-1b e AE-1c estão interpostas. Isso significa que existem alternativas com a mesma produção de óleo para os 3 problemas que levam à VPL similares. Entretanto, a melhor solução para os 3 problemas ocorreu após a correção, sendo que a correção para o problema AE-1a obteve o melhor VPL. Mesmo assim, a melhor opção para o problema AE-1b tem um VPL semelhante à alternativa ótima.

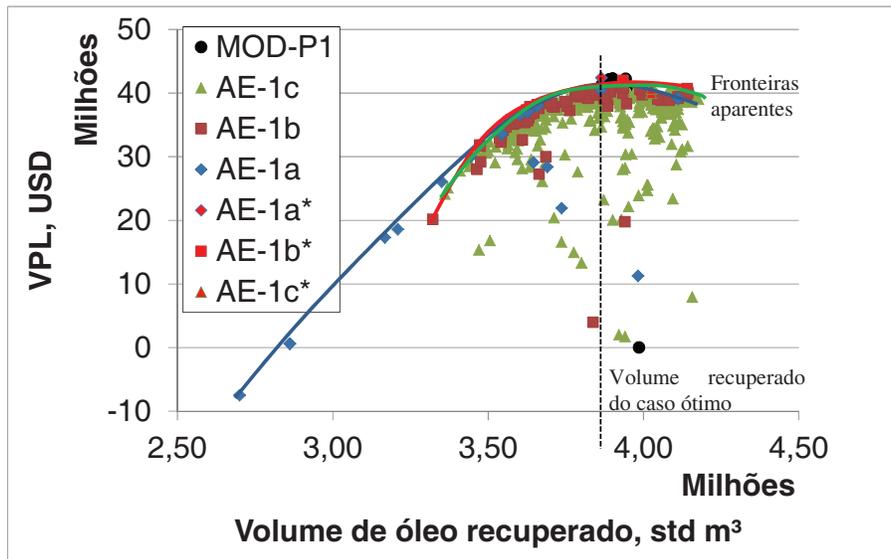


Figura 5-11: Relação entre volume de óleo recuperado e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1e.

O método MOD-P apresentou uma baixa dispersão para os valores testados de volume de óleo recuperado. Todas as alternativas avaliadas tiveram um volume de óleo recuperado próximo ao volume de óleo recuperado da melhor alternativa apresentada pelo AE. Portanto, o método MOD-P foi eficiente na busca da solução ótima para o problema MOD-P1.

Observa-se também que os pontos de máximo de cada problema apresentam um valor semelhante para o volume de óleo recuperado. Este resultado mostra que o número de válvulas, com sua operação otimizada, não foi fator determinante para o aumento da recuperação de óleo. Entretanto, observa-se que as alternativas com maior número de válvulas atingiram melhores resultados em termos de VPL quando o volume de óleo recuperado foi maior que 4 milhões de m³.

Pode-se concluir pela análise dos gráficos de VPL e volume de óleo recuperado que:

- por meio da otimização dos problemas AE-1 foi possível descrever uma fronteira aparente bem delimitada, com exceção do problema AE-1a para algumas regiões de volume de óleo. Portanto, afirma-se que os métodos de otimização foram eficientes na busca do máximo global e apresentaram soluções compatíveis com os objetivos da execução desta otimização;
- o método MOD-P apresentou baixa dispersão para valores de volume de óleo recuperado para todas as alternativas testadas, em comparação com os resultados do método AE. Este resultado mostra que a avaliação dos indicadores levou o método a uma busca mais direta na região do ótimo global da função, evitando fazer buscas em regiões menos favoráveis à viabilidade das válvulas;
- considerando a variação das alternativas testadas em todos os problemas de um mesmo caso, conclui-se que a variação na produção de óleo foi relativamente pequena entre as alternativas otimizadas de cada problema;
- para a maioria dos casos em que a correção foi necessária, o VPL foi melhorado.

A Figura 5-12 à Figura 5-16 mostram a relação entre o VPL de cada alternativa, descontado do VPL da estratégia inicial, e o volume de água produzida. Assim como para a análise do volume de óleo recuperado, o objetivo desta análise é mostrar como os métodos de otimização buscaram alternativas para alcançar o máximo VPL. Com isso, pretende-se comprovar a eficiência do método AE para auxiliar a validação do método MOD-P.

A Figura 5-12 mostra a relação entre o VPL das alternativas avaliadas e a produção de água para o caso M-1a. Percebe-se que para o problema AE-1a a fronteira aparente traçada não é suficientemente descrita por pontos em duas regiões. Isto mostra que o AE testou um número insuficiente de alternativas para garantir uma boa descrição da fronteira e corroborar que a melhor resposta é o ótimo global. Entretanto, observa-se que a melhor resposta para o problema AE-1a está relativamente próximo das melhores alternativas encontradas no problema MOD-P1. Portanto, pode-se concluir que esta análise gráfica corrobora para a avaliação do ótimo global do problema

AE-1a. Para os problemas AE-1b e AE-1c, observa-se que o traçado da fronteira aparente está bem delimitado.

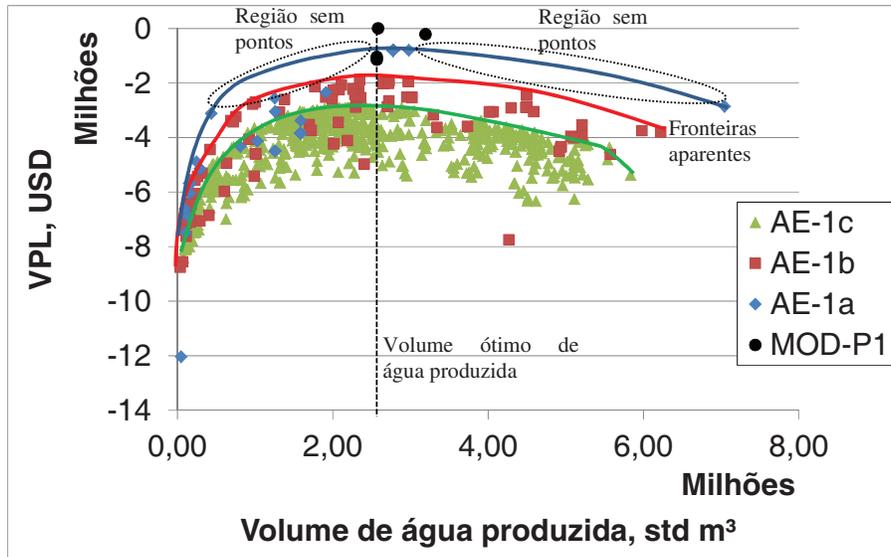


Figura 5-12: Relação entre volume produzido de água e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1a.

Observa-se que as produções de água ótimas para os 3 problemas otimizados mais a produção da estratégia inicial tem aproximadamente o mesmo valor de água produzida. A inclinação das fronteiras mostra que as alternativas que diminuem a produção de água têm maior impacto no VPL do que as alternativas que aumentam a produção de água. Portanto, uma redução mais drástica da produção de água total leva a estratégias mais inviáveis, enquanto que estratégias com maior produção final de água tendem a manter a viabilidade do projeto em níveis próximos ao do ótimo.

O método MOD-P apresentou soluções próximas ao do valor ótimo encontrado. Entretanto, a melhor alternativa diferente da estratégia inicial obteve uma produção de água 0,50 milhões de m³ maior. Isto indica que podem existir alternativas com VPL semelhantes, mas com diferentes volumes de água total produzida.

A Figura 5-13 mostra que, para o caso M-1b, as fronteiras aparentes foram bem delimitadas, com exceção do trecho após o valor ótimo no problema AE-1a. Para este trecho não houve pontos em uma faixa de mais de 4 milhões de m³. Este fato pode indicar que o ótimo atingido não

foi o ótimo global, para o problema AE-1a. Entretanto, os pontos gerados no trecho da esquerda indicam que o valor ótimo não deve ser muito maior que o encontrado no problema MOD-P1. Assim como no caso M-1a, observa-se uma maior sensibilidade do VPL para valores mais baixos de produção de água. Para produções mais baixas o uso de 3 válvulas obteve um resultado semelhante ao uso de uma única válvula.

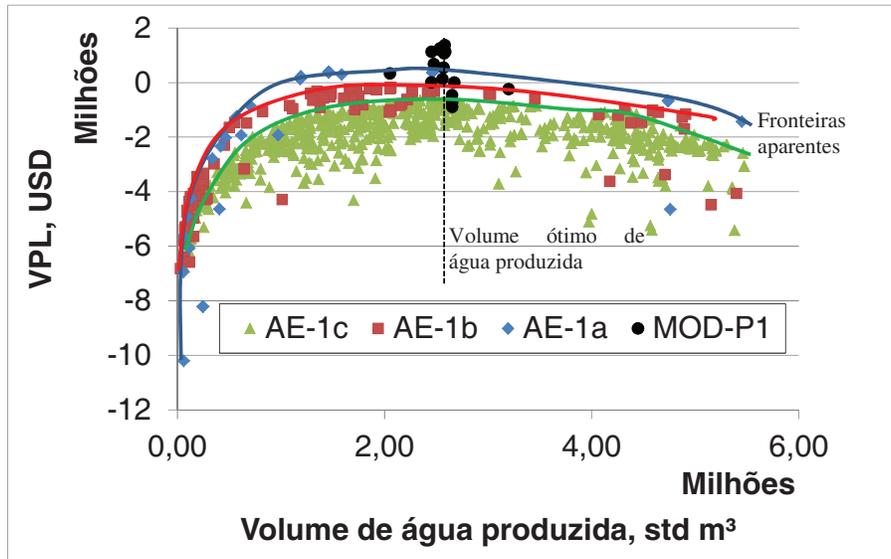


Figura 5-13: Relação entre volume produzido de água e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1b.

O método MOD-P obteve resultados melhores que o método AE, mas o volume de água produzida das alternativas otimizadas em cada problema foi semelhante. O método MOD-P direcionou a maior parte das buscas para alternativas com um valor de volume final de água próximo, sendo que apenas dois testes levaram a uma alternativa com um valor de produção de água maior ou menor que 1 milhão de m³.

A Figura 5-14 mostra os resultados obtidos para o caso M-1c. Nota-se que fronteiras aparentes foram mais bem delimitadas que no caso anterior, para o problema AE-1a. Também se observa a similaridade entre os valores ótimos fornecidos em cada problema de otimização e o distanciamento do valor do volume da água produzida do valor obtido na estratégia inicial e das alternativas otimizadas.

Percebe-se na Figura 5-14 que as alternativas que formam a fronteira aparente dos problemas AE-1a e AE-1b têm comportamento semelhante em toda a sua extensão. Apenas para casos com baixo VPL e volume de água produzida é que as alternativas do problema AE-1c se igualam às demais. Portanto, para o caso M-1c as alternativas entre ter uma ou três válvulas começam ter indicadores equivalentes.

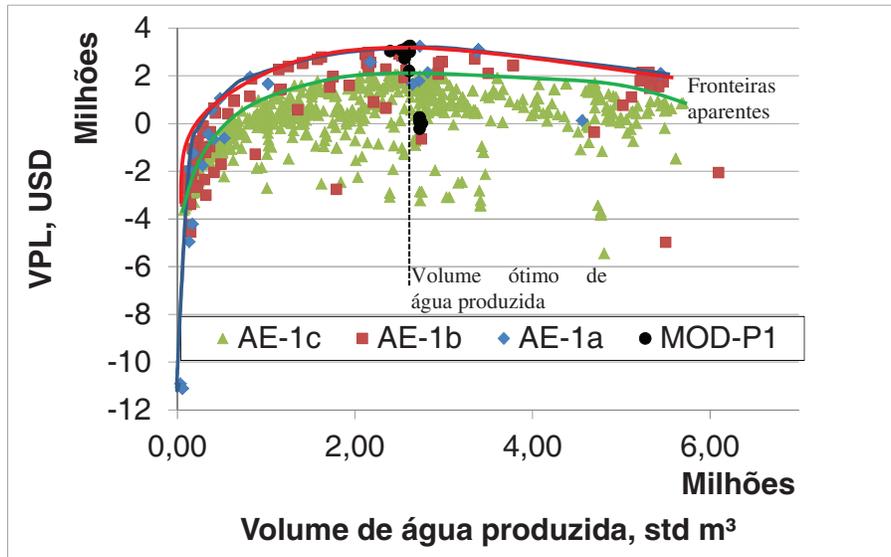


Figura 5-14: Relação entre volume produzido de água e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1c.

O método MOD-P buscou alternativas próximas à alternativa da estratégia inicial. Porém, a maior parte dos testes se concentrou na região do ponto de ótimo do caso. Mesmo assim, o método apresentou baixa dispersão para valores de volume de água produzida. Conclui-se que a Figura 5-14 mostra a eficiência do método MOD-P do ponto de vista do volume de água produzida.

Na Figura 5-15, observa-se que o trecho central dos problemas AE-1b e AE-1c do caso M-1d tem soluções equivalentes de VPL para diferentes valores de volume de água produzida. É importante destacar que a faixa de valores do VPL é maior que a faixa obtida nos casos anteriores e que esta semelhança é relativa à escala dos gráficos. Este resultado indica que para o caso com permeabilidade mais forte existem várias alternativas para controle das válvulas que geram resultados financeiros proporcionalmente equivalentes em termos de ganhos.

A delimitação da fronteira do problema AE-1a não apresentou pontos suficientes para indicar se a fronteira aparente representa realmente o contorno das soluções do problema. Entretanto, assim como nos casos anteriores, o valor ótimo de água produzida foi semelhante ao ótimo encontrado.

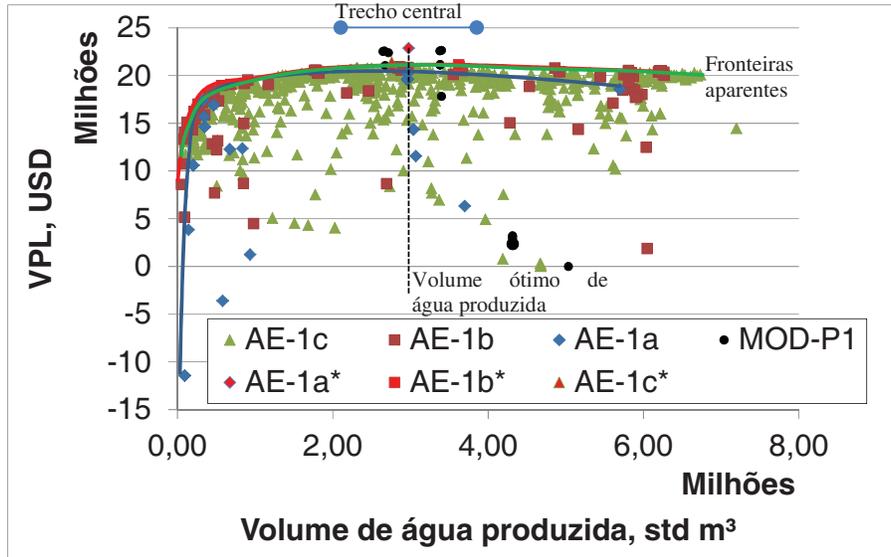


Figura 5-15: Relação entre volume produzido de água e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1d.

Em geral, todas as otimizações levaram a estratégias com os valores de volume de água produzida semelhantes. Entretanto, para o problema MOD-P1, as melhores alternativas foram 0,40 milhões de m³ para mais ou para menos do valor de água produzida para o caso ótimo, encontrado na correção do problema AE-1a. Isto representa uma diferença de aproximadamente 13%.

Em relação às alternativas avaliadas no problema MOD-P1, observa-se que o método avaliou estratégias de controle gradualmente mais distantes da produção de água da estratégia inicial. Entretanto, percebe-se que poucas simulações foram utilizadas em alternativas com valores distantes do ótimo.

A Figura 5-16 mostra os resultados dos indicadores obtidos na otimização do caso M-1e. Considerando apenas os problemas AE-1, observa-se que as alternativas apresentadas no problema AE-1b foram as mais bem avaliadas sem o uso da correção. Entretanto, a curva de fronteira

traçada para o problema AE-1a não pôde ser bem delimitada, ocorrendo trechos com pontos espaçados. Entretanto, como nos casos anteriores, observa-se que o método AE-1a fornece uma alternativa próxima da encontrada no problema AE-1b e a sua correção gerou a melhor alternativa testada para todo o caso.

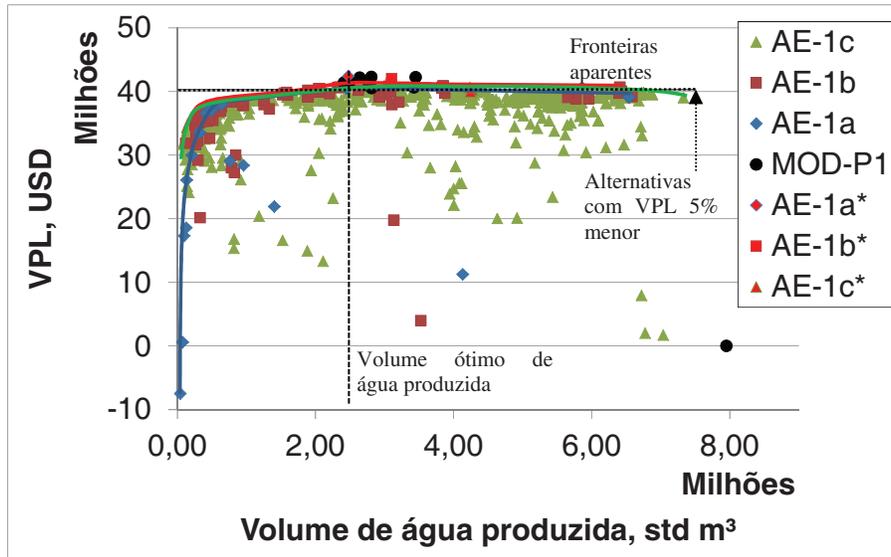


Figura 5-16: Relação entre volume produzido de água e VPL para todas as estratégias testadas na otimização do caso M-1e.

Com o uso da correção, o problema AE-1a indicou a melhor alternativa, sem o uso de válvulas de controle e com a não completção de parte significativa do poço. Entretanto, o problema AE-1b também apresentou uma alternativa relativamente próxima da melhor encontrada, diferença de USD 0,42 milhões para um ganho máximo de USD 42 milhões. Além disso, traçando-se uma linha com 95% do VPL encontrado pela melhor alternativa, observa-se que um número significativo de alternativas está acima desta linha e que a faixa de valores para produção de água é significativa.

O método MOD-P alcançou resultados próximos à alternativa otimizada já nas primeiras simulações. Nota-se que o problema MOD-P1 também sugere alternativas com VPL similar, mas com volumes de água produzida diferente. As melhores alternativas avaliadas pelo método MOD-P obtiveram indicadores similares à melhor alternativa apresentada no problema AE-1a corrigido.

Pode-se concluir pela análise da Figura 5-12 à Figura 5-16 que:

- a otimização dos problemas AE-1 apresentou uma fronteira aparente bem delimitada para os problemas AE-1b e AE-1c. Entretanto, para o problema AE-1a a fronteira aparente foi traçada por meio de pontos espaçados. Porém, observa-se que as alternativas ótimas apontadas para cada caso foram coerentes em termos de volume de água produzida com as alternativas apresentadas por outros problemas. Além disso, o problema AE-1a apresentou as melhores soluções para 2 casos, após a correção. Portanto, a análise dos indicadores apresentados nas figuras corrobora para o entendimento de que o método MOD-P foi eficiente na busca do máximo global e apresentaram soluções compatíveis com as soluções apresentadas pelo AE;
- pode-se afirmar que as avaliações realizadas pelo método MOD-P seguiram sequências diretas para o ponto de ótimo. Apesar de apresentarem alguma dispersão de valores de volume de água produzida, as avaliações se concentraram em sua maior parte na região de máximo da função-objetivo. Este resultado mostra que a avaliação dos indicadores levou o método a uma busca mais direta na região do ótimo global da função, evitando fazer buscas em regiões menos favoráveis a viabilidade das válvulas;
- para os casos com maior permeabilidade do canal, nota-se que uma significativa faixa de alternativas com diferentes valores de volume de água produzida alcançaram VPL semelhantes. Isto indica que existem diferentes formas de controle e projeto de número e posição que podem gerar o mesmo VPL;
- para os casos em que a correção foi necessária, a solução apresentada não variou de forma significativa o volume de água produzida. Portanto, a não completção de regiões não alterou significativamente os volumes de água produzida, mas acrescentou de forma benéfica a dedução dos investimentos necessários para instalação de válvulas.

5.1.4 Avaliação dos indicadores ao longo da otimização do problema MOD-P1

Nesta seção é realizada uma análise para avaliar o uso dos indicadores na otimização realizada pelo método MOD-P. A partir da premissa que no exemplo E-1, as regiões próximas à região do canal têm maior potencial para aplicação de válvulas de controle, mostra-se como os indicadores evoluíram ao longo do tempo para o poço produtor e suas RMP. O objetivo desta análise é mostrar a eficiência dos indicadores em apontar que o poço tem potencial para iniciar uma otimização e também que a sequência mais favorável é analisar inicialmente as RMP mais próximas à região de maior permeabilidade.

Na primeira parte desta seção, serão mostrados os indicadores relativos à estratégia inicial de todos os casos do exemplo E-1. Uma segunda parte apresentará a evolução dos indicadores após a inclusão de válvulas de controle, para alguns casos. Com isso, pretende-se avaliar a ação dos indicadores durante todo o processo de otimização, e mostrar as diferenças entre os diferentes casos.

5.1.4.1 Avaliação dos indicadores da estratégia inicial

Nesta seção serão apresentados os indicadores de campo, de poço e região, utilizados no método MOD-P para avaliar a estratégia inicial. Como o exemplo E-1 tem apenas um poço, considera-se que os indicadores de campo e de poço são equivalentes e apenas os indicadores de poço e região serão apresentados. Os indicadores serão apresentados seguindo a sequência: indicadores classificatórios, eliminatórios e de projeto. Portanto, são apresentados inicialmente os indicadores eliminatórios I_1 , para o campo, I_2 e I_3 , para campo e região, e I_4 para poço. Em seguida os indicadores classificatórios I_6 e I_2 para região e I_7 para região. Por último, será apresentado o indicador de projeto I_5 .

O indicador I_1 apresentou os seguintes valores, 0,01, 0,01, 0,01, 0,02 e 0,07, para os casos M-1a, M-1b, M-1c, M-1d e M-1e, respectivamente. Como o critério adotado, C_1 , tem valor igual 0,10, em nenhum caso se identificou a restrição à continuidade da avaliação do uso de válvulas de controle pelo indicador eliminatório I_1 . Portanto, este indicador não influenciou na otimização do problema MOD-P1.

A Figura 5-17 mostra a evolução do indicador I_2 ao longo do tempo utilizado na previsão, apresentando o comportamento da variação do fluxo de caixa do campo e poço. Observa-se que as perdas de fluxo de caixa nos primeiros 5 anos da produção são maiores para os modelos com maior permeabilidade do canal, embora nos 3 primeiros anos os modelos M-1a, M-1b e M-1c tenham indicadores semelhantes. Entretanto, após o sétimo ano, há uma inversão no comportamento dos indicadores e os modelos com menor permeabilidade do canal têm uma perda de fluxo de caixa anual maior. Portanto, a presença de um canal mais atuante faz com que a queda do fluxo de caixa seja mais forte no início da produção, enquanto que se o canal tem menor permeabilidade, a queda no fluxo de caixa é maior no final da produção.

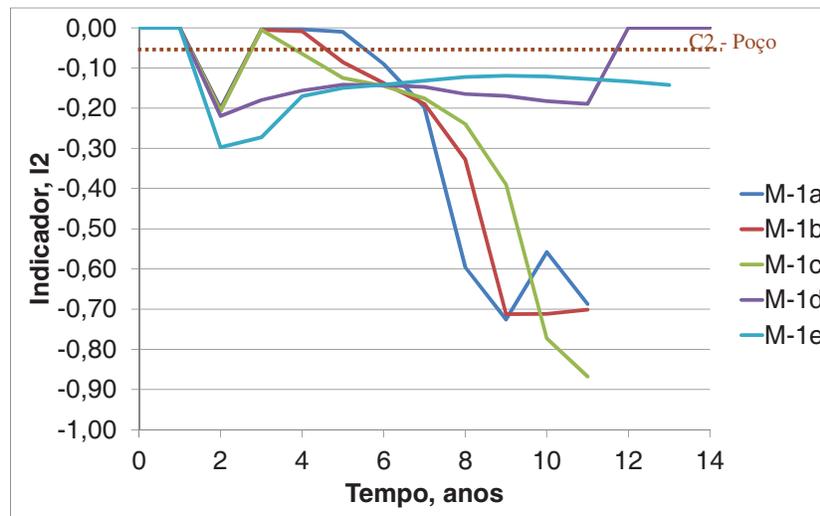


Figura 5-17: Evolução do indicador I_2 para poço ao longo do tempo simulado.

Observa-se também que após o segundo ano de produção, o indicador I_2 permanece abaixo do critério C_2 , para poço. Isto indica que o poço está apto a ser avaliado durante quase todo o seu período de produção. Já os poços dos modelos M-1a, M-1b e M-1c não geraram indicadores favoráveis à avaliação durante o período de 4, 3 e 2 anos, respectivamente. Para o modelo M-1d, o indicador I_2 mostra a viabilidade para avaliação do segundo ano ao décimo primeiro ano, 2 anos antes de a produção ser encerrada. Portanto, observa-se que os modelos com maior permeabilidade do canal têm um maior período que o indicador aponta viabilidade de avaliação.

Conclui-se que o indicador I_2 mostra que os modelos devem ser avaliados para a maior parte do tempo de produção. Como o caso com canal é um caso com potencial para uso de válvulas, o indicador I_2 apontou adequadamente a viabilidade de avaliação para os casos.

O indicador I_3 mostra a variação do corte de água ao longo do tempo (Figura 5-18). A Figura 5-18 está limitada ao valor de 1 no eixo das ordenadas, mas os valores do indicador foram maiores em alguns casos. O motivo desta limitação se deve ao fato de terem sido encontrados picos de valores de até 1410 para o indicador I_3 no caso M-1e. Portanto, limitou-se o gráfico para mostrar de forma clara quando o indicador apresentou valores maiores ou menores que os critérios adotados.

Observa-se que o aumento no corte de água ocorre gradualmente iniciando pelo caso M-1e e M-1d até o caso M-1a. Porém, para o caso M-1e, a variação do corte de água diminui significativamente já no terceiro ano e o indicador I_3 passa a indicar inviabilidade de avaliação após o sexto ano. Para o caso M-1a, o aumento do corte de água só é identificado a partir do quinto ano e o indicador I_3 permanece acima dos critérios de viabilidade de avaliação até o oitavo ano. Apesar de o indicador de aumento do corte de água ocorrer antes para os casos com maior permeabilidade do canal, o tempo que se indica a viabilidade para avaliação é semelhante para os dois casos. A mesma conclusão pode ser obtida avaliando os outros casos, M-1b, M-1c e M-1d.

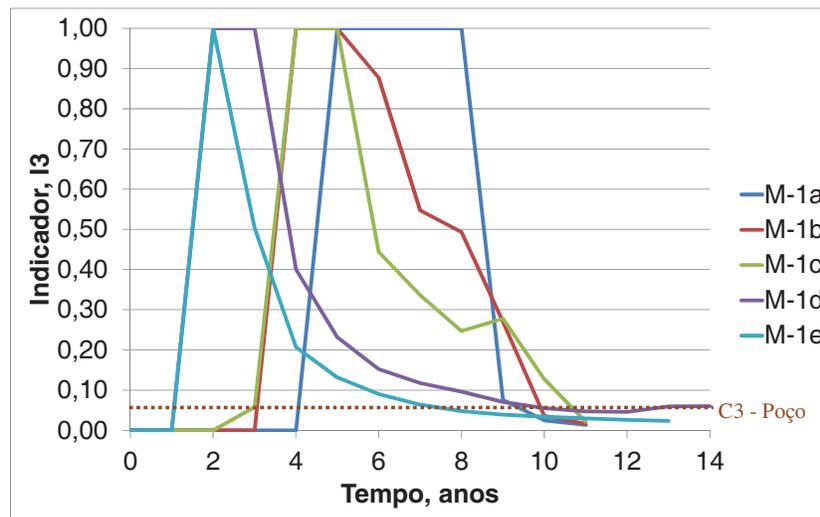


Figura 5-18: Evolução do indicador I_3 para poço ao longo do tempo simulado.

A Figura 5-19 mostra a interação entre os indicadores de viabilidade de avaliação para os casos M-1a e M-1e. A área 1 do gráfico (em vermelho) é a área em que os dois indicadores I_2 e I_3 indicam a viabilidade de avaliação para o caso M-1e. A área 2 (em roxo) do gráfico é a área em que os dois indicadores I_2 e I_3 indicam a viabilidade de avaliação para o caso M-1a.

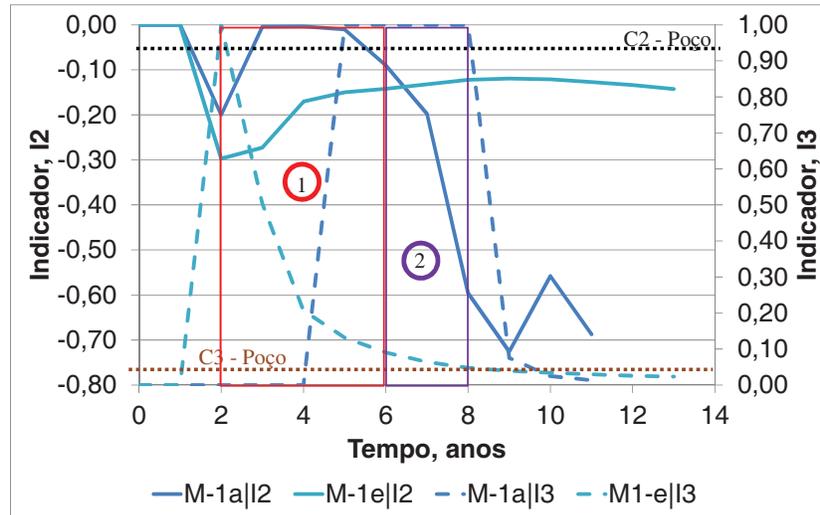


Figura 5-19: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para o poço P-01 nos casos M-1a e M-1e e delimitação das regiões de avaliação.

Observa-se na Figura 5-19, que apesar do indicador I_2 apontar viabilidade de avaliação para o caso M-1a no segundo ano, o indicador I_3 não aponta um aumento do corte de água. Portanto, neste ponto o que ocorreu é que a queda do fluxo de caixa líquido não foi relacionada com o aumento da produção de água e não foi um indicativo de avaliação. O mesmo ocorre com o caso M-1e após o sexto ano. Apesar da queda no fluxo de caixa líquido, não se identificou uma relação com um aumento expressivo do corte de água.

Conclui-se que os indicadores de poço restringiram a avaliação em todos os casos. Esta restrição reduziu a avaliação para faixas de aproximadamente 5 e 3 anos ao invés de avaliar todo o tempo de produção. Quanto maior a permeabilidade do canal, mais as avaliações são realizadas mais cedo. Portanto, para casos em que se espera que as válvulas de controle fechassem mais cedo, as avaliações também começam mais cedo.

A Figura 5-20 mostra a variação do fluxo de caixa por região do poço P-01 no caso M-1a. Nota-se que as regiões $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ apresentam uma queda expressiva no FCL a partir do

quarto ano. Esta queda foi observada durante todo o período de produção. Neste período, enquanto o FCL das demais regiões apresentou um aumento, estas duas regiões apresentaram queda. Portanto, o indicador I_2 mostra que as regiões mais próximas ao canal devem ser avaliadas inicialmente, apesar de o indicador apontar que as regiões mais distantes do canal teriam potencial para avaliação em tempos posteriores.

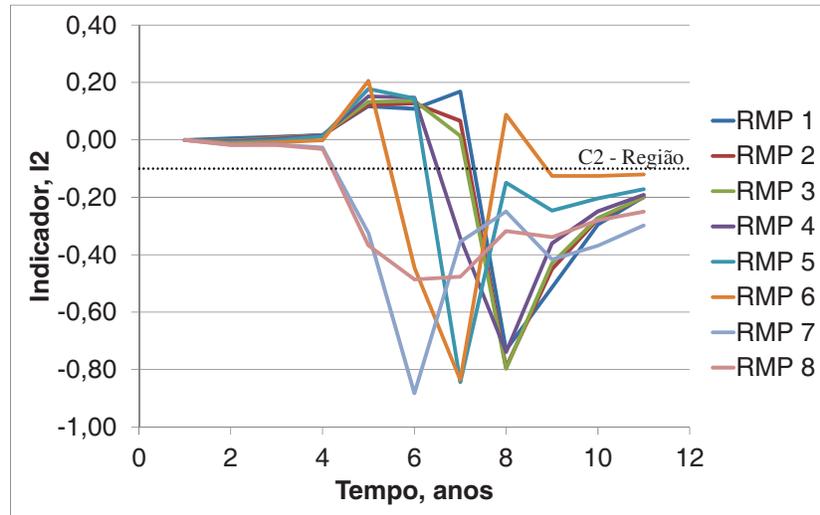


Figura 5-20: Evolução do indicador I_2 para regiões do poço no caso M-1a.

A Figura 5-21 mostra a variação do FCL por região para o caso M-1e. Observa-se que o fluxo de caixa sofreu uma redução significativa desde o início da produção para as regiões $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$. As demais regiões têm uma variação positiva do fluxo de caixa líquido no início da simulação, mas já no terceiro ano apresentam uma queda que se mantém até o final da produção.

Apenas a região $RMP^{7,1}$ permaneceu com o indicador I_2 com valores abaixo do critério C_2 para região por todo o tempo de produção. Apesar da região $RMP^{8,1}$ ter a maior variação negativa de I_2 , a partir do sétimo ano este indicador se tornou positivo. Portanto, o indicador I_2 mostra uma viabilidade para avaliação para as regiões mais próximas do canal já no início da produção, com regiões mais distantes ganhando viabilidade ao longo do tempo de produção.

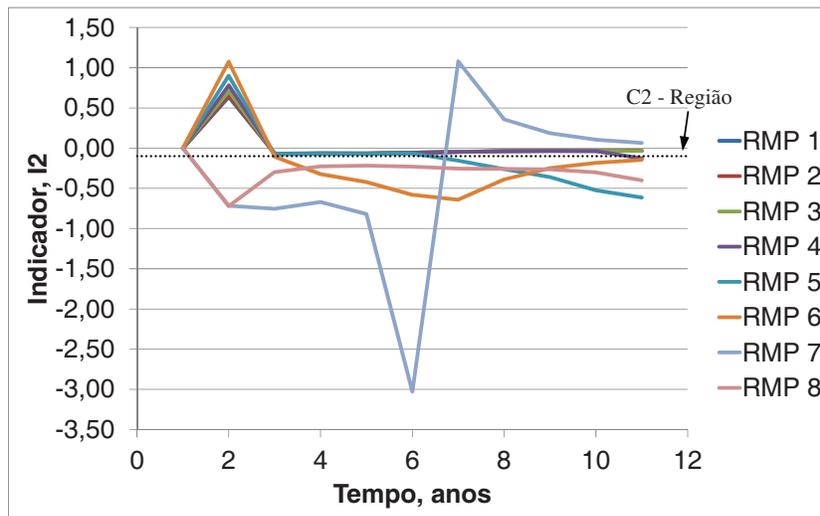


Figura 5-21: Evolução do indicador I_2 para regiões do poço no caso M-1e.

Analisando a Figura 5-20 e a Figura 5-21, nota-se que o fluxo de caixa por região é significativamente alterado com o aumento da permeabilidade do canal. Para o caso M-1a, o início da produção apresenta uma maior estabilidade do indicador I_2 em cada região, enquanto que para o caso M-1e existem variações significativas. Outra característica importante é que para o caso M-1a as variações de todas as regiões atingiram valores negativos semelhantes, enquanto que para o caso M-1e, as variações negativas para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ foram visualmente mais significativas.

Portanto, as características do indicador I_2 mostram que quanto maior a permeabilidade do canal, maior a diferença da variação entre as regiões e maior a significância das variações para as regiões mais próximas do canal. Além disso, as variações negativas ocorrem mais cedo para o caso com maior permeabilidade do canal, principalmente para as regiões próximas a ele. Conclui-se que o indicador I_2 para região apresentou as características esperadas de identificar a potencialidade das regiões mais próximas do canal, de identificar o maior potencial desde o início da produção e a maior diferença entre as regiões para canais mais permeáveis.

A Figura 5-22 mostra a evolução do indicador I_3 para regiões do caso M-1a. I_3 está limitado ao valor de 1 na figura para focar na região próxima ao valor do critério C_3 adotado, mas I_3 atingiu valores superiores a 1000 em alguns casos. Estes altos valores foram encontrados em pontos isolados de I_3 para cada região.

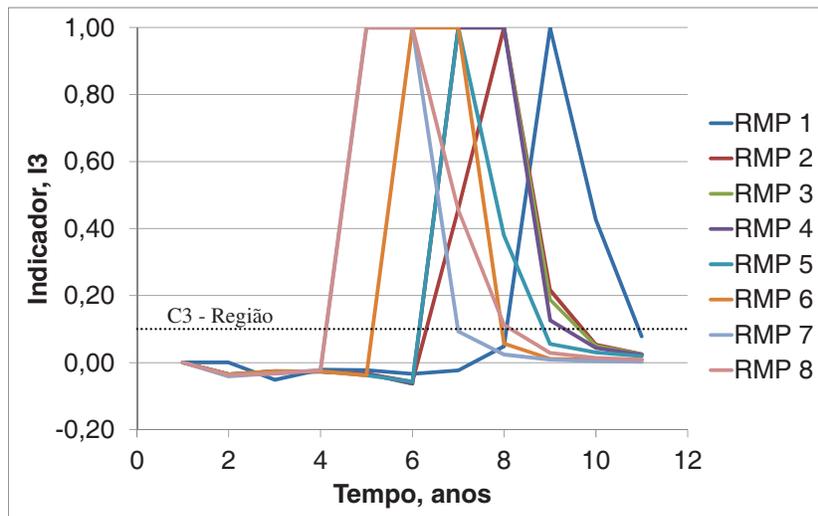


Figura 5-22: Evolução do indicador I_3 para regiões ao longo do tempo simulado para o caso M-1a.

Observa-se na Figura 5-22 que todas as curvas seguem um padrão semelhante de comportamento. O início das curvas apresentam valores de I_3 abaixo do critério, depois, as curvas apresentam um pico e, em seguida, um declínio acentuado que leva o indicador a valores abaixo do critério C_3 . A principal diferença entre as curvas é o momento em que a inclinação acentuada se inicia. Quanto mais próximas ao canal, mais as regiões têm o aumento do valor do indicador I_3 mais cedo. As curvas permanecem de 3 a 4 anos com valores acima do valor do critério C_3 para região. Portanto, o indicador I_3 indica uma avaliação de todas as regiões, por um tempo similar, mas em momentos diferentes da vida útil do poço.

A Figura 5-23 mostra o indicador I_3 para o caso M-1e, para regiões nas mesmas condições mostradas na Figura 5-22, com o valor do indicador limitado na parte superior ao valor de 1. Os valores do indicador I_3 foram limitados para os indicadores das regiões $RMP^{4,1}$, $RMP^{5,1}$, $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$, sendo que as regiões $RMP^{1,1}$, $RMP^{2,1}$ e $RMP^{3,1}$ não atingiram o valor 1. O maior pico foi encontrado para a região $RMP^{7,1}$ com valor igual a 3218, que significa que o corte de água teve seu valor aumentado em 3218 vezes em um único ano.

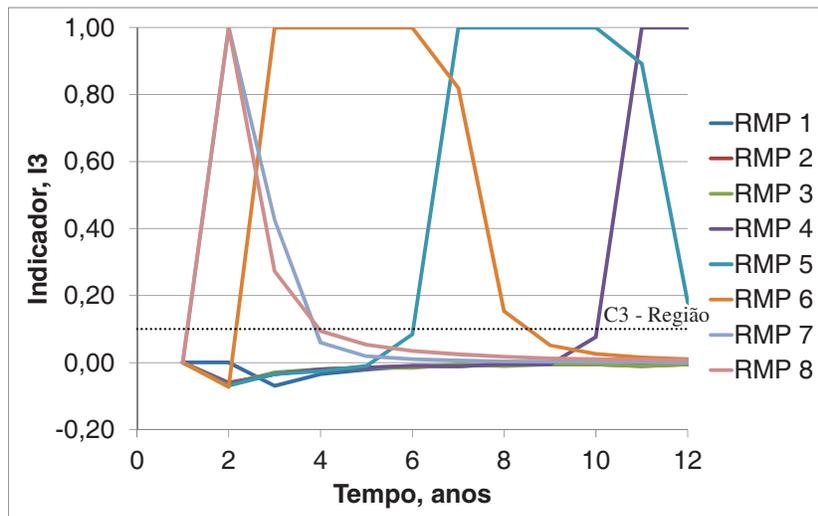


Figura 5-23: Evolução do indicador I_3 para poço ao longo do tempo simulado para o caso M-1e.

Observam-se na Figura 5-23 diferentes comportamentos entre as curvas de cada região. As curvas das regiões $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ apresentam uma ascensão rápida desde o segundo ano da produção, porém após o quarto ano, o indicador I_3 já está abaixo do valor do critério C_3 para a região e permanece assim até o fim da produção. As regiões $RMP^{5,1}$ e $RMP^{6,1}$ apresentam um início mais tardio para ascensão da curva, mas o indicador I_3 permanece acima do critério C_3 por 6 anos. A região $RMP^{4,1}$ apresenta uma ascensão no final da vida útil do poço e as regiões $RMP^{1,1}$, $RMP^{2,1}$ e $RMP^{3,1}$ permaneceram com o indicador I_3 abaixo do critério por toda a produção.

Portanto, o indicador I_3 aponta uma viabilidade para avaliação já nos primeiros anos para as regiões mais próximas do canal. As regiões mais centrais têm viabilidade alguns anos depois, mas por um período mais longo no tempo, e as regiões mais distantes não apresentam viabilidade para avaliação. Conclui-se que este indicador também apresentou coerência com o esperado e apontou as regiões mais próximas do canal para serem avaliadas inicialmente.

A Figura 5-24 e Figura 5-25 mostram a evolução dos indicadores I_2 e I_3 para as regiões $RMP^{1,1}$ e $RMP^{7,1}$ para os casos M-1a e M-1e. O objetivo desta análise é mostrar como os indicadores apontam ou não a viabilidade de avaliação e mostrar que as regiões mais próximas do canal tendem a ser avaliadas inicialmente. As regiões $RMP^{1,1}$ e $RMP^{7,1}$ foram escolhidas por represen-

tarem os extremos na evolução dos indicadores, sendo a região mais distante e a mais próxima do canal, respectivamente.

Na Figura 5-24, a área 1 do gráfico (em vermelho) representa a área em que está indicada a viabilidade de avaliação da região $RMP^{7.1}$. A área 2 do gráfico (em roxo) representa a área em que há viabilidade de avaliação da região $RMP^{1.1}$. Observa-se nos dois casos que a intercessão entre as curvas dos indicadores promovida pelos critérios reduz de forma significativa o período em que cada região pode ser avaliada. Além disso, a região $RMP^{7.1}$ apresenta viabilidade para avaliação em um tempo anterior e por um tempo maior do que a $RMP^{1.1}$. Portanto, assim como esperado, as avaliações iniciaram com a região mais próxima ao canal e, apesar da região $RMP^{1.1}$ apresentar viabilidade para avaliação, as regiões mais distantes tiveram sua viabilidade confirmada apenas para tempos mais próximos ao fim da vida útil do poço.

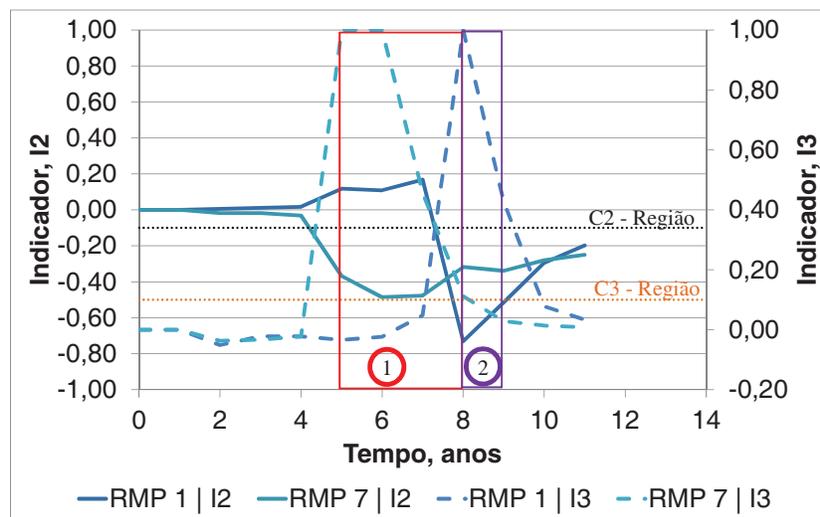


Figura 5-24: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para as regiões $RMP^{1.1}$ e $RMP^{7.1}$ no caso M-1a e delimitação das regiões de avaliação.

Já na Figura 5-25, não se observou a viabilidade para avaliação da região $RMP^{1.1}$. Tanto a variação no fluxo de caixa quanto a variação do corte de água não ultrapassaram os limites impostos pelos critérios. Entretanto, foi identificada a viabilidade de avaliação para a região $RMP^{7.1}$ entre o segundo ano e o quarto ano de produção. Portanto, para o caso com maior permeabilidade do canal, a viabilidade de avaliação da região mais próxima do canal continua existindo, mas

ocorre para um tempo menor, enquanto que a viabilidade de regiões mais distantes passa a não existir.

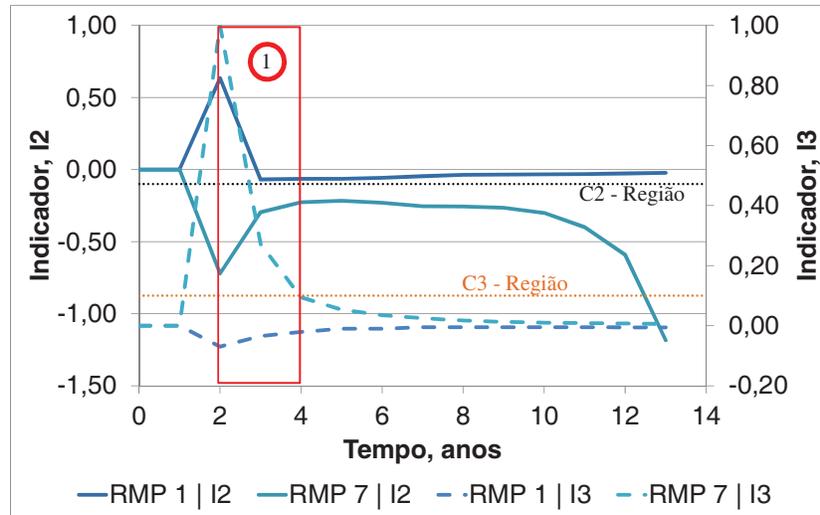


Figura 5-25: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para as regiões $RMP^{1,1}$ e $RMP^{7,1}$ no caso M-1e e delimitação das regiões de avaliação.

Pode-se concluir pela análise da Figura 5-24 e da Figura 5-25 que os indicadores apontaram de forma coerente os seguintes pontos:

- cenários com maior permeabilidade do canal sugerem controle de válvulas mais cedo;
- regiões mais próximas ao canal têm viabilidade de avaliação mais cedo;
- regiões mais distantes do canal têm menor viabilidade de avaliação em cenários onde a permeabilidade do canal é maior.

Portanto, os resultados apontam que os indicadores foram eficientes para restringir o período de avaliação e também apresentaram coerência na apresentação da viabilidade com o que era esperado para o caso M-1.

A Figura 5-26 mostra a evolução do indicador I_4 para o poço para todos os casos analisados no exemplo E-1. O indicador I_4 aponta uma distribuição irregular do corte de água para uma região significativa do poço P-01 em todos os casos, com valor acima do critério especificado. Observa-se que quanto maior a permeabilidade do canal, mais cedo a diferença entre os cortes de

água ocorre e mais tempo o indicador apresenta valores acima do critério. Portanto, existe uma tendência de que quanto maior a permeabilidade do canal maior é o valor do indicador I_4 para um mesmo tempo.

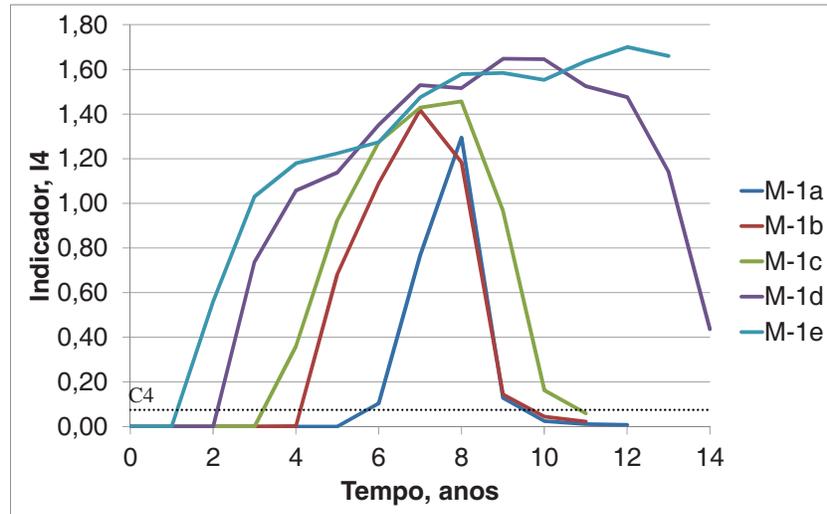


Figura 5-26: Evolução do indicador I_4 para o poço no exemplo E-1.

Analisando o valor do indicador I_4 no final da vida útil do poço, pode-se concluir que em cenários com maior permeabilidade do canal, maior é a diferença de corte de água entre as regiões. Isto indica que, nestes casos, algumas regiões estão produzindo mais água que o limite econômico e outras regiões estão fechando com corte de água abaixo do limite. Isto indica um potencial maior para controle do poço.

Avaliando de forma conjunta os indicadores eliminatórios, I_1 , I_2 , I_3 e I_4 , observa-se que a região $RMP^{7,1}$ é a região a ser primeiramente avaliada no processo em todos os casos e se mantém apresentando viabilidade para tempos posteriores. Com isso, conclui-se que a metodologia de otimização MOD-P sempre elegeria a $RMP^{7,1}$ durante o processo de avaliação. Entretanto, outras regiões também poderiam entrar de forma gradativa com o tempo na avaliação caso não fosse identificada a viabilidade de válvulas de controle nos anos iniciais.

Os indicadores classificatórios serão mostrados apenas para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$, devido terem apresentado com maior potencial na análise dos indicadores eliminatórios. As análises também serão restritas aos casos M-1a e M-1e. Com isso pretende-se reduzir a quan-

tidade de análises que seriam necessárias para mostrar os indicadores para todas as regiões. Serão apresentados os indicadores classificatórios na seguinte ordem: I_6 , I_2 e I_7 .

A Figura 5-27 apresenta a evolução do indicador I_6 , considerando que para o caso M-1a os indicadores classificatórios apontaram uma viabilidade de avaliação do ano 6 até o ano 8. Durante os 3 anos, o indicador classificou a região $RMP^{7,1}$ como a de maior potencial para avaliação. Isto indica que os custos com a produção de água impactam de forma mais significativa a região $RMP^{7,1}$.

Observa-se que enquanto I_6 para a região $RMP^{6,1}$ apresenta um valor alto no sexto ano, os indicadores da região $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ já apresentam valores mais próximos de zero. Entretanto, o indicador I_6 tem um forte declínio no sétimo ano, e passa a ter a relação o custo com a água e fluxo de caixa líquido com a mesma ordem de grandeza das outras duas regiões. Porém, neste caso a região $RMP^{7,1}$ seria a selecionada nos 3 anos.

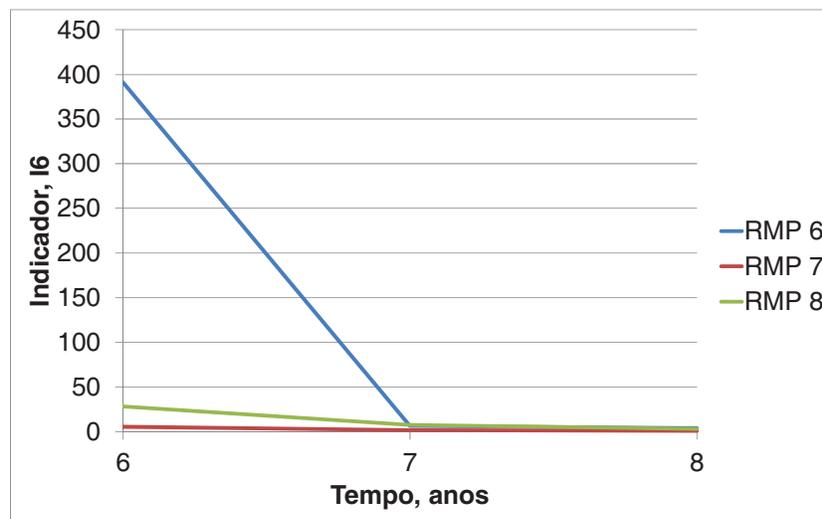


Figura 5-27: Evolução do indicador I_6 para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ do caso M-1a.

A Figura 5-28 mostra o indicador I_6 para as 3 regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ para o caso M-1e. Observa-se que a região $RMP^{7,1}$ é também classificada como a região de maior potencial nos 3 tempos analisados, por ter uma relação fluxo de caixa e custo de água produzida menor que as outras 2 regiões. Comparando com os resultados da Figura 5-27, nota-se que a região $RMP^{6,1}$ apresenta valores mais altos para o indicador I_6 durante os 3 anos de análise. Portanto, as

regiões mais próximas do canal sofrem maior impacto negativo no indicador I_6 em cenários com maior permeabilidade do canal, enquanto regiões mais distantes tendem a ter um melhor valor para este indicador.

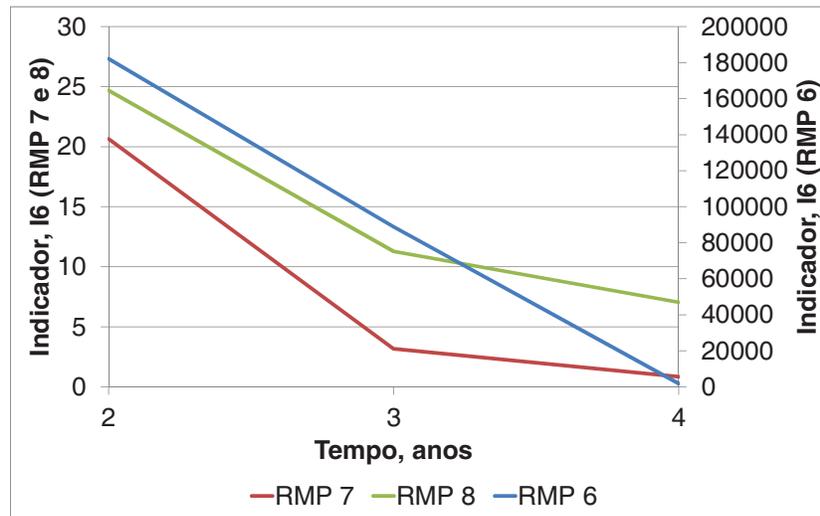


Figura 5-28: Evolução do indicador I_6 para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ do caso M-1e.

O segundo indicador classificatório, I_2 , para o caso M-1a está apresentado na Figura 5-29. Observa-se que para cada tempo avaliado, uma região diferente é apontada por este indicador como a de maior potencial. Portanto, a variação do fluxo de caixa líquido no tempo pode gerar a seleção de regiões diferentes do que o analisado pelo indicador I_6 , sendo esse o objetivo de avaliar mais de um indicador.

Já para o caso M-1e, observa-se uma mudança apenas no segundo ano, quando a região $RMP^{8,1}$ tem o maior potencial de avaliação para este indicador (Figura 5-30). No terceiro e no quarto ano, a opção seria avaliar a região $RMP^{7,1}$. Portanto, o indicador I_2 proporcionaria uma avaliação diferente da avaliação do indicador I_6 apenas para o segundo ano.

As regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ não apresentaram fluxo de caixa negativo para os anos 6,7 e 8, no caso M-1a, e também para os anos 2,3 e 4, para o caso M-1e. Portanto, a classificação pelo indicador I_7 não aponta uma preferência para testes e o método MOD-P não faria mais testes com base nesta classificação para o ES3.

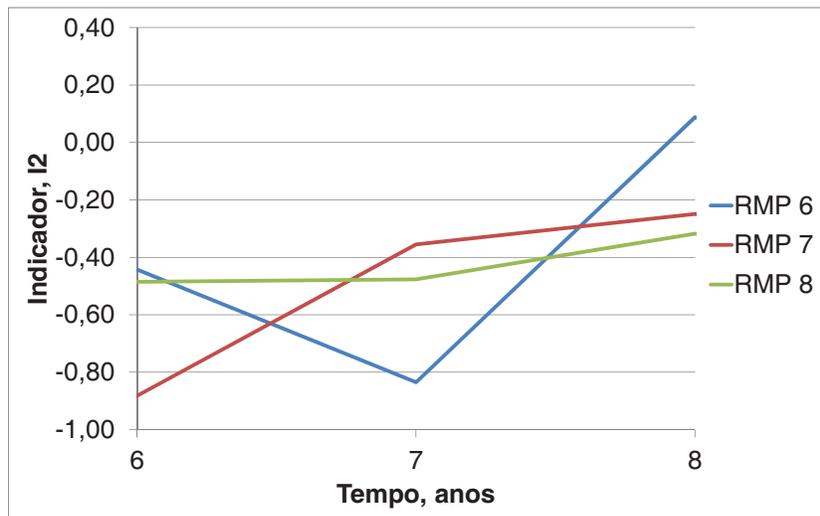


Figura 5-29: Evolução do indicador I_2 para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ do caso M-1a.

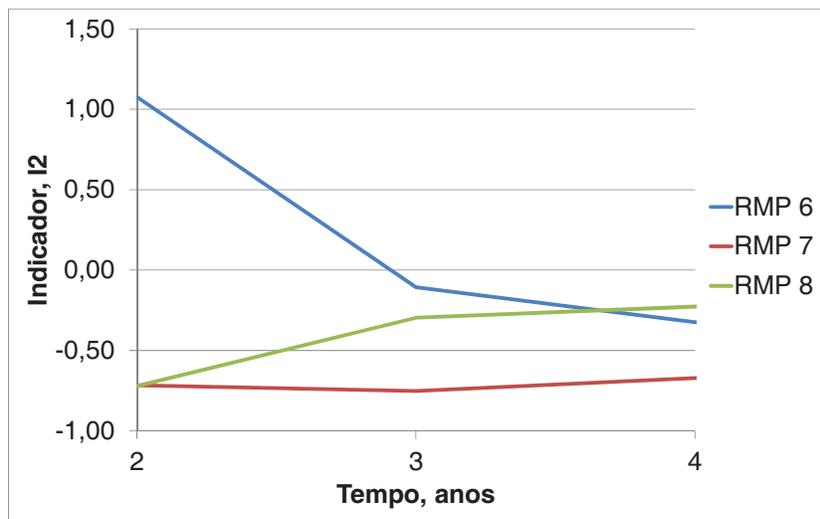


Figura 5-30 Evolução do indicador I_2 para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ do caso M-1e.

Para mostrar os detalhes do indicador de projeto I_5 , apresenta-se a diferença entre o corte da região selecionada e as regiões mais próximas. A região selecionada é a $RMP^{7,1}$, que obteve o maior potencial de avaliação a partir do uso dos indicadores eliminatórios e classificatórios e as regiões mais próximas analisadas são as regiões $RMP^{6,1}$ e $RMP^{8,1}$. Primeiramente, serão apresentados os resultados relativos ao caso M-1a e, em seguida, para o caso M-1b.

Observa-se na Figura 5-31 que apenas a região $RMP^{8,1}$ seria combinada à região $RMP^{7,1}$ no sexto ano para formar uma região de influência de uma válvula de controle com base no critério adotado. Observa-se uma grande diferença entre o corte de água da região $RMP^{6,1}$ e $RMP^{7,1}$ no sexto ano, mas esta diferença tem uma redução significativa nos anos seguintes. Entretanto, não é suficiente para validar uma combinação com a região $RMP^{7,1}$. Como os resultados da otimização não sugeriram a aplicação de válvulas de controle, não é possível avaliar a eficiência do indicador em sugerir combinações.

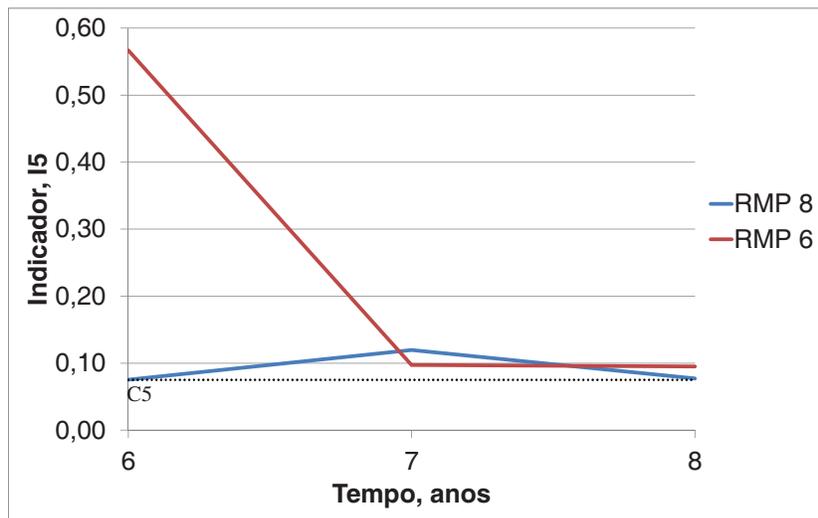


Figura 5-31: Evolução do indicador I_5 com base na região $RMP^{7,1}$ para cálculo da diferença do corte de água para as regiões $RMP^{6,1}$ e $RMP^{8,1}$ do caso M-1a.

Para o caso M-1e, a diferença entre os cortes de água para as completções $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ está abaixo do critério adotado no segundo ano, mas apresenta uma tendência de aumentar nos anos seguintes (Figura 5-32). Já para região $RMP^{6,1}$, o resultado apresenta uma grande diferença entre os cortes de água. Portanto, o método MOD-P testaria a combinação $RMP^{7,1}$ e $RMP^{8,1}$ para os anos 2 e 3. A combinação das duas regiões fez parte da solução otimizada encontrada pelo MOD-P. Portanto, o critério foi eficiente para combinar as duas regiões. Entretanto, observa-se pelo resultado otimizado do método AE que mais completções poderiam ser combinadas. Portanto, em alguns casos a combinação de regiões com diferenças significativas entre os cortes de água pode ser vantajosa.

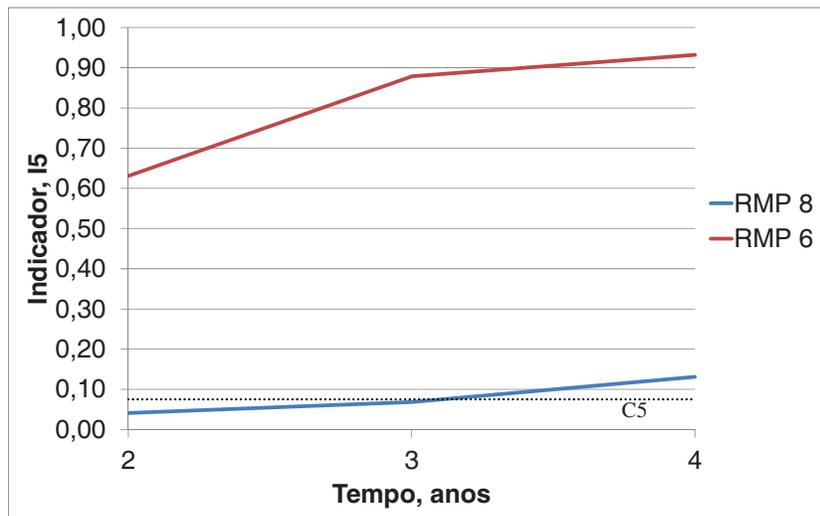


Figura 5-32: Evolução do indicador I_5 com base na região $RMP^{7,1}$ para cálculo da diferença do corte de água para as regiões $RMP^{6,1}$ e $RMP^{8,1}$ do caso M-1e.

A análise dos indicadores gerados para a estratégia inicial mostra que os critérios adotados e os indicadores utilizados apresentaram um bom desempenho na seleção das regiões que em teoria teriam o maior potencial para a aplicação de válvulas de controle. São elas as regiões mais próximas do canal. Em alguns casos e para tempos mais próximos ao fim da vida útil do poço, também foi indicada a viabilidade de avaliação de regiões mais distantes do canal. Entretanto, considerando que o método MOD-P segue uma sequência de avaliação que inicia no tempo zero e segue até o final da vida útil do campo, conclui-se que as regiões próximas do canal são avaliadas primeiro que as regiões mais distantes.

Os indicadores classificatórios apontaram em geral a região $RMP^{7,1}$ como a região com maior potencial de avaliação, o que foi coerente com o esperado. Entretanto, alguns indicadores apontaram outras regiões em tempos diferentes. Essas regiões não foram tão distantes do canal, mas foram diferentes da região $RMP^{7,1}$. Portanto, a mudança do indicador gera uma avaliação diferente dependendo do indicador de classificação. Esta classificação com indicadores diferentes pode auxiliar na busca por alternativas em casos mais complexos.

Entretanto, observa-se que o uso do corte de água para definir a melhor combinação de regiões para serem controladas por uma válvula pode levar a uma otimização direta da região de controle de uma válvula. Podem ser necessários alguns ciclos de avaliação para unir regiões com

viabilidade de serem controladas por uma válvula. Entretanto, o seu corte de água também gerou resultados satisfatórios para alguns casos, combinando regiões que levaram a uma otimização direta.

5.1.4.2 Avaliação dos indicadores após a inclusão de uma válvula de controle

Nesta seção são apresentados os resultados do caso M-1c após a identificação da viabilidade da utilização de uma válvula de controle para controlar a região $RMP^{7,1}$ no tempo $t^{k=4}$. O objetivo desta análise é mostrar a mudança nos indicadores em relação aos obtidos na estratégia inicial. Com isso, espera-se mostrar que a avaliação continua a apontar as regiões mais próximas do canal como as regiões de maior potencial para avaliação.

A Figura 5-33 mostra os indicadores I_2 e I_3 , para poço, para a estratégia inicial (EI) e a estratégia que está em processo de otimização (Otimizando), após a seleção de uma válvula de controle para operar a região $RMP^{7,1}$. O indicador I_3 está limitado no gráfico ao valor de um 1. Apesar de ter atingido valores mais altos, limitou-se o valor para dar foco à região de valores próxima ao valor do critério C_3 .

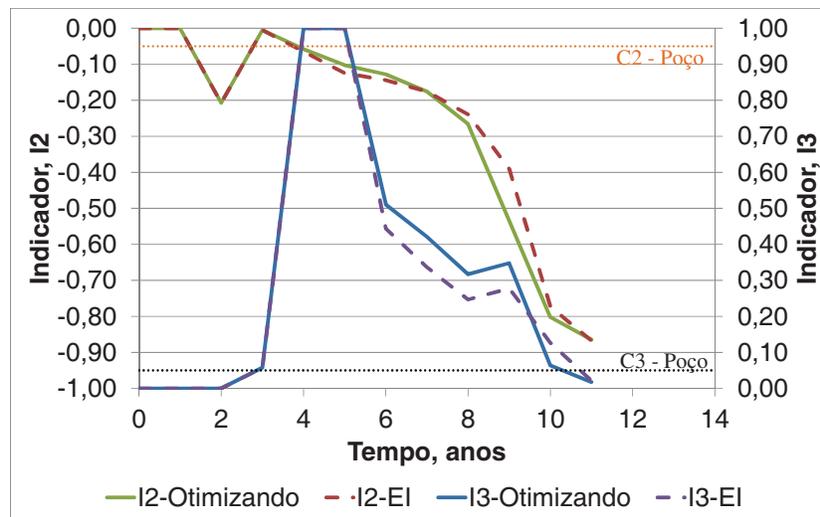


Figura 5-33: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para o poço P-01 e para o caso M-1c, após a inclusão de uma válvula de controle na região $RMP^{7,1}$.

Observa-se que imediatamente após o fechamento da região $RMP^{7,1}$ o indicador I_2 apresenta uma redução na inclinação da curva, que significa que houve uma redução na variação do fluxo

de caixa líquido. Portanto, o indicador mostra uma pequena melhora do resultado. Porém, a melhora não foi suficiente para alterar a potencialidade de avaliação nesta data. Além disso, a partir do oitavo ano, observa-se uma inversão dos indicadores, e a variação do fluxo de caixa líquido passa a ser pior para o caso com o fechamento da região $RMP^{7,1}$.

O mesmo ocorre com o indicador I_3 . Observa-se uma melhora no indicador, com a redução do aumento do corte de água nos anos seguintes ao fechamento da região $RMP^{7,1}$, mas a melhora não é suficiente para mudar a decisão sobre avaliar o poço no tempo $t^{k=4}$. Entretanto, observa-se uma piora do indicador depois do décimo ano.

Portanto, os indicadores mostram que ainda existe um potencial, identificado pela curva de indicadores do poço, para uma avaliação do fechamento de alguma região. Os resultados mostram que existe uma melhora nos indicadores logo após definição de uma válvula de controle, mas os indicadores tornam-se piores para tempos mais próximos ao final da vida útil da produção.

Nota-se uma pequena variação dos indicadores I_2 e I_3 da região $RMP^{8,1}$ imediatamente após o fechamento da região $RMP^{7,1}$ (Figura 5-34). O indicador I_2 se mantém similar nas duas avaliações até o nono ano, quando o fluxo de caixa da estratégia em processo de otimização tem uma redução significativa. A variação do corte de água se mantém menor durante toda a vida útil do poço com uma tendência de aproximação entre as duas curvas. Entretanto, a mudança não sugere uma diferença entre o potencial de avaliação da região ao longo do tempo, o que significa que a região $RMP^{8,1}$ continuaria sendo avaliada na mesma data.

Na Figura 5-35 observa-se uma mudança significativa nos indicadores da região $RMP^{6,1}$ nos anos seguintes após o fechamento da região $RMP^{7,1}$. Os resultados mostram uma melhora significativa no fluxo de caixa líquido da região $RMP^{6,1}$, e imediatamente seguida por uma forte queda no indicador. Da mesma forma, a variação do corte de água é maior para o quarto ano, mas o indicador I_3 inicia a queda mais cedo a partir do sétimo ano. Isto pode ser explicado pelo ganho de vazão propiciado pelo fechamento da região $RMP^{7,1}$ e a mais rápida chegada de água na região $RMP^{6,1}$. Portanto, observa-se um aumento no fluxo de caixa combinado com um maior aumento no corte de água.

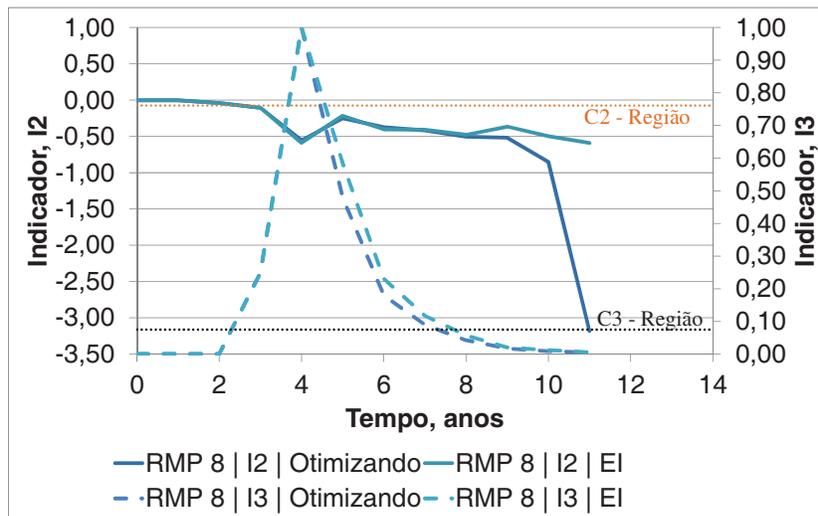


Figura 5-34: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para a região $RMP^{8.1}$ e para o caso M-1c, após a inclusão de uma válvula de controle na região $RMP^{7.1}$.

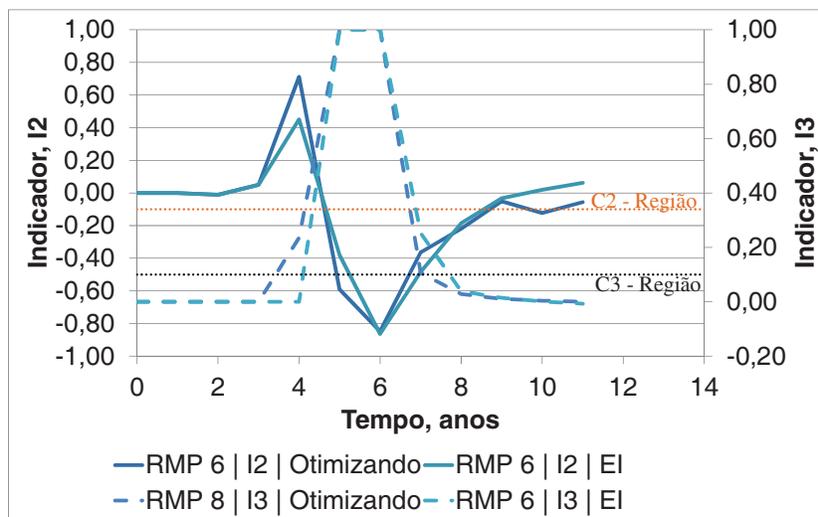


Figura 5-35: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para a região $RMP^{6.1}$ e para o caso M-1c, após a inclusão de uma válvula de controle na região $RMP^{7.1}$.

O indicador I_2 para a região $RMP^{1.1}$ mostra um aumento na variação do fluxo de caixa durante os anos seguintes ao fechamento da região $RMP^{7.1}$ (Figura 5-36). Esta variação deve-se ao ganho de produtividade da região com o fechamento da região com maior influência do canal. O indicador I_3 mostra que a chegada de água foi retardada 1 ano, mas não alterou a potencialidade de avaliação da região, que permaneceu ocorrendo no mesmo período.

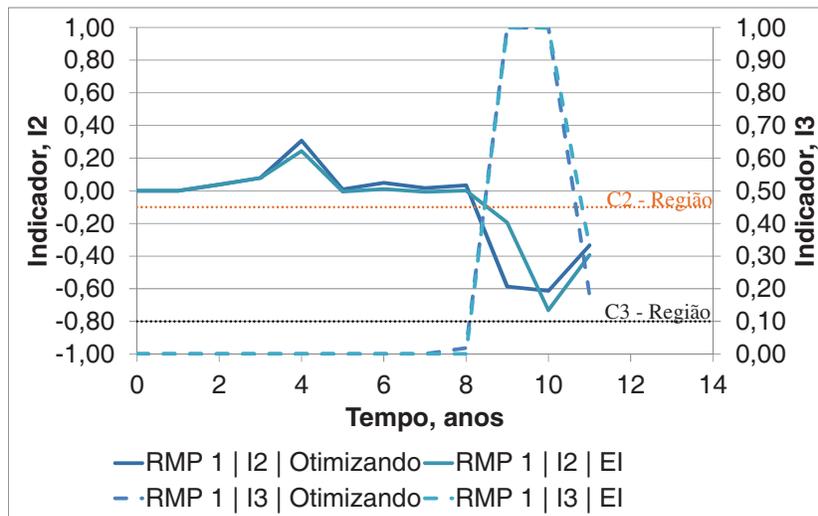


Figura 5-36: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para a região $RMP^{1,1}$ e para o caso M-1c, após a inclusão de uma válvula de controle na região $RMP^{7,1}$.

Nota-se que a combinação dos indicadores sugere o mesmo período de potencialidade de avaliação para as três situações avaliadas. Entretanto, pode-se concluir que o fechamento da região $RMP^{7,1}$ afetou de forma mais impactante a região $RMP^{6,1}$ do que a região $RMP^{8,1}$ e a região $RMP^{1,1}$. Observa-se também que os benefícios trazidos pelo fechamento da região $RMP^{7,1}$ são mais duradouros nas regiões mais distantes do canal. Por um período de tempo inicial, a variação do fluxo de caixa se mantém positiva e com maior intensidade nessas regiões. Já na região $RMP^{6,1}$ a melhor ocorreu apenas no ano seguinte ao fechamento da região $RMP^{7,1}$. Portanto, conclui-se que a tendência é de que as regiões mais próximas da região fechada tenham o potencial de avaliação adiantado no tempo.

Na Figura 5-37 observa-se uma significativa diferença entre o indicador I_4 da estratégia inicial e da estratégia com modificação. Os resultados mostram que o indicador I_4 tem seu valor reduzido no período logo após o fechamento da região $RMP^{7,1}$. Isso significa que o valor do corte de água ao longo do poço é mais equilibrado. Porém, os picos desse indicador têm valores semelhantes, podendo-se concluir que o fechamento da região não evitou o desequilíbrio dos valores do corte de água, apesar de atrasar o seu aparecimento.

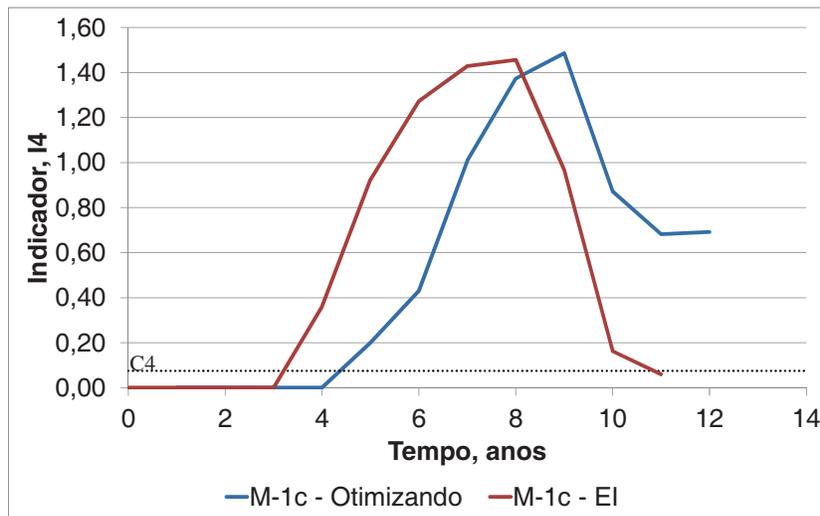


Figura 5-37: Evolução do indicador I_4 para o poço P-01 e para o caso M-1c, após a inclusão de uma válvula de controle na região $RMP^{7,1}$.

Os resultados apresentados na Tabela 5-8 mostram que o indicador I_6 para a região $RMP^{1,1}$ é maior para o exemplo que está em processo de otimização (Otimizando) do que o indicador da estratégia inicial (EI). Isso significa que após o fechamento da região $RMP^{7,1}$, a região $RMP^{1,1}$ perde potencial de ser avaliada. De forma contrária, as regiões $RMP^{6,1}$ e $RMP^{8,1}$ ganham potencial para avaliação. Este resultado é coerente com o esperado, já que as regiões mais próximas à região fechada devem ter maior impacto negativo na produção de água. Entretanto, o indicador não muda a decisão de avaliar a região $RMP^{8,1}$ primeiramente do que $RMP^{6,1}$.

Tabela 5-8: Indicador I_6 para as regiões $RMP^{1,1}$, $RMP^{6,1}$ e $RMP^{8,1}$ para a estratégia inicial e em processo de otimização do caso M-1c.

Região	Exemplo	I_6					
		$t^{k=5}$	$t^{k=6}$	$t^{k=7}$	$t^{k=8}$	$t^{k=9}$	$t^{k=10}$
$RMP^{1,1}$	EI	220431	222198	223884	1284	30	13
$RMP^{1,1}$	Otimizando	221892	224236	225822	221339	114	19
$RMP^{6,1}$	EI	823	15	4	3	2	2
$RMP^{6,1}$	Otimizando	207	7	2	2	1	1
$RMP^{8,1}$	EI	18	9	4	2	1	0
$RMP^{8,1}$	Otimizando	14	6	3	1	0	0

Na Tabela 5-9, mostram-se os resultados obtidos para o indicador I_2 . Observa-se que, assim como para o indicador I_6 , a região $RMP^{1,1}$ perde potencial de avaliação, pois a variação do fluxo de caixa líquido segure menores perdas para a região, com exceção do décimo ano. Da mesma forma, as regiões $RMP^{6,1}$ e $RMP^{8,1}$ têm o seu fluxo de caixa afetado de forma negativa pelo fechamento da região $RMP^{7,1}$.

Entretanto, este indicador passa a classificar a região $RMP^{6,1}$ como a de maior potencial no quinto e sexto anos, enquanto que na estratégia inicial o maior potencial é identificado até o sétimo ano. Portanto, sugere uma avaliação diferente do indicador I_6 , mas as regiões continuam apresentando a mesma classificação da estratégia inicial.

Tabela 5-9: Indicador I_2 para as regiões $RMP^{1,1}$, $RMP^{6,1}$ e $RMP^{8,1}$ para a estratégia inicial e em processo de otimização do caso M-1c.

Região	Exemplo	I_2					
		$t^{k=5}$	$t^{k=6}$	$t^{k=7}$	$t^{k=8}$	$t^{k=9}$	$t^{k=10}$
$RMP^{1,1}$	EI	0,00	0,01	0,00	0,00	-0,20	-0,73
$RMP^{1,1}$	Otimizando	0,01	0,05	0,02	0,03	-0,59	-0,61
$RMP^{6,1}$	EI	-0,38	-0,86	-0,48	-0,18	-0,03	0,02
$RMP^{6,1}$	Otimizando	-0,59	-0,85	-0,36	-0,22	-0,05	-0,12
$RMP^{8,1}$	EI	-0,22	-0,40	-0,41	-0,48	-0,36	-0,50
$RMP^{8,1}$	Otimizando	-0,25	-0,37	-0,42	-0,50	-0,52	-0,85

O indicador I_7 não identificou nenhum fluxo de caixa negativo para no período entre o quinto e o nono ano de produção. Considerando que a região escolhida fosse a região $RMP^{8,1}$, não é possível combiná-la com outras regiões, pois não existe nenhuma região subjacente aberta. Caso a região escolhida fosse a região $RMP^{6,1}$, a diferença entre o corte de água entre a região $RMP^{6,1}$ e a região $RMP^{5,1}$ seria de 0,15, 0,78 e 0,16, para os anos $t^{k=5}$, $t^{k=6}$ e $t^{k=7}$. Portanto, não haveria uma combinação entre as regiões $RMP^{5,1}$ e $RMP^{6,1}$.

5.1.5 Conclusão da análise dos resultados do exemplo E-1

Pode-se concluir que os resultados apontados pelo algoritmo evolucionário e pelo método MOD-P foram semelhantes. Em geral, obteve-se uma correspondência não só no VPL atingido,

como também nos indicadores de produção avaliados. Entretanto, em alguns casos obteve-se um número diferente de válvulas de controle. Também se obteve diferentes comprimentos das regiões delimitadas pela colocação dos *packers*.

O número de simulações requeridas na otimização pelo MOD-P apresentou valores na ordem de grandeza de dezenas. Este número indica que o método utilizou poucas simulações em comparação a casos apresentados na literatura.

O uso do algoritmo evolucionário para gerar uma superfície de resposta com a fronteira bem definida foi realizado com sucesso para a maioria dos casos. Entretanto, alguns casos apresentaram uma baixa qualidade para delimitação da fronteira. Observando os valores máximos atingidos para o VPL, pode-se concluir que o método AE apresentou boas respostas para o problema.

O processo de otimização pelo método MOD-P seguiu uma sequência de avaliação dentro da esperada. As regiões mais próximas do canal foram testadas primeiramente. Em geral, os indicadores apontaram que as regiões mais próximas tinham potencial de avaliação para os anos iniciais de produção. Por outro lado, as regiões mais distantes não apresentaram potencial de avaliação ou apresentaram potencial no final da vida útil. Com isso, o método MOD-P excluiu testes em regiões com menor potencial e eliminou simulações desnecessárias de forma coerente.

Observou-se também uma restrição de avaliação no tempo. Sendo assim, as avaliações não permitiram testes de fechamento de válvulas no final da vida útil do poço, que teriam menos potencial de serem vantajosas. Entretanto, como os indicadores usados neste trabalho têm como base a produção do poço, algumas operações otimizadas que fecharam a região antes da chegada de água, não foram captadas de forma direta pelo método MOD-P.

5.2 Resultados do exemplo E-2

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos da aplicação dos métodos de otimização no exemplo E-2.

5.2.1 Comparação geral entre MOD-P e AE

A Tabela 5-10 mostra as informações relativas à função-objetivo obtidas para os problemas propostos de otimização, MOD-P e AE, e outras informações gerais para auxiliar na comparação entre os dois métodos. A primeira coluna contém os indicadores da otimização. As demais colunas são separadas pelos modelos de reservatórios com uma subdivisão para separar cada um dos dois métodos utilizados.

Tabela 5-10: Informações gerais sobre a otimização do exemplo E-2 para o modelo econômico ME-2a.

Indicadores	M-2a		M-2b		M-2c		M-2d	
	MOD-P	AE	MOD-P	AE	MOD-P	AE	MOD-P	AE
Número de válvulas corrigido	11	0	10	12	1	0	0	0
VPL da estratégia inicial (USD, milhões)	990,29		927,45		158,31		253,17	
Aumento no VPL (USD, milhões)	47,86	0,00	47,29	2,79	1,25	0,00	0,00	0,00
Aumento Proporcional (%)	5	0,00	5	<1	1	0	0	0
Investimentos (USD, milhões)	8,20	0,00	7,20	9,50	1,00	0,00	0,00	0,00
Diferença entre métodos (USD, milhões)	47,86		44,50		1,25		0	
Simulações utilizadas	191	1042	218	1042	49	1041	43	1041
VPL otimizado (USD, milhões)	1038,15		974,74		159,56		253,17	

Observa-se que, para todos os casos, o método MOD-P obteve uma melhor resposta da função-objetivo. O método AE não obteve sucesso em encontrar uma resposta positiva partindo do problema montado para o caso M-2a. Já para o caso M-2b, a solução encontrada pelo AE obteve um aumento significativamente menor do que a solução encontrada pelo MOD-P. Nos casos M-2c e M-2d, as soluções encontradas pelo método AE não superaram a alternativa da estratégia inicial, que, portanto, é a melhor alternativa após a otimização. O método MOD-P apresentou

uma melhora de 1% com a colocação de uma válvula para o caso M-2c e não obteve sucesso na melhora da estratégia do caso M-2d.

Portanto, partindo do problema proposto, o método AE não foi capaz de apresentar uma solução satisfatória utilizando o número de simulações imposto para a otimização das 36 variáveis de controle. Por outro lado, o método MOD-P obteve soluções melhores em 3 casos, sendo que para o caso M-2d, a solução encontrada foi não implementar mudanças na estratégia inicial. Conclui-se que o método MOD-P obteve melhores respostas que o AE e apontou soluções que sugere de forma viável o uso de válvulas de controle. Além disso, o método AE não conseguiu encontrar boas soluções, principalmente para o caso M-2a.

Observa-se também na Tabela 5-10 que, devido ao fato de o método AE não encontrar solução melhor que a estratégia inicial para o caso M-2a, o número de válvulas ótimo foi significativamente diferente para o caso M-2a. Para os casos M-2b o número otimizado de válvulas de controle encontrado em ambos os métodos foi similar. Já para os casos M-2c e M-2d, a maior inviabilidade para a instalação de válvulas de controle neste caso, fez com que o número de válvulas fosse semelhante. Portanto, nota-se que os métodos apresentaram diferentes soluções em termos de número de válvulas para os casos em que o potencial de aplicação de válvulas foi significativo.

O número de simulações utilizadas pelo método MOD-P foi da ordem de 200 simulações para os casos M-2a e M-2b e da ordem de 50 simulações para os casos M-2c e M-2d. Estes números foram significativamente inferiores ao número de simulações imposto ao método AE. Considerando que, o número de simulações utilizado pelo AE não foi suficiente para gerar uma boa solução em alguns casos, conclui-se que o número de simulações utilizadas pelo método MOD-P foi baixo.

A melhora sugerida para a estratégia inicial nos casos M-2a e M-2b foi de 5% no VPL da estratégia inicial. O VPL apresentado para a mudança na estratégia, calculado pelo VPL da estratégia otimizada menos o VPL da estratégia inicial, foi aproximadamente 47 milhões para esses dois casos. Já o método AE apresentou uma melhora menor que 1% para o caso M-2b. Portanto, para os casos em que se verificou o maior potencial de aplicação de válvulas, o método MOD-P

apontou um crescimento de 5%, enquanto que o método AE não apresentou crescimento significativo.

Para exemplificar as diferenças encontradas entre os métodos, considerando a distribuição das válvulas de controle ao longo dos poços, apresentam-se as soluções encontradas para o caso M-2b. Neste caso, o número de válvulas foi similar e o objetivo desta análise é mostrar quais as posições das válvulas de controle e o tempo de fechamento sugerido para todas as válvulas.

Na Tabela 5-11, são apresentadas as variáveis com a solução otimizada pelos métodos MOD-P e AE para o caso M-2b com o modelo econômico ME-2a. Observa-se que o MOD-P apontou que 6 dos 9 poços devem ter pelo menos 1 válvula de controle, enquanto que o AE apontou 8 poços. Os resultados mostram que 4 poços tiveram o mesmo número de válvulas de controle, Prod-1, Prod-6, Prod-8 e Prod-9. Os poços Prod-3 e Prod-5 obtiveram 1 válvula a mais pelo método MOD-P e os poços Prod-4 e Prod-7, uma válvula a mais pelo AE. Apenas o poço Prod-2 apresentou uma diferença superior a uma válvula de controle, obtido pelo método AE. Percebe-se que quase a metade dos poços avaliados obteve o mesmo número de válvulas e a maior parte do restante teve uma diferença de apenas uma válvula.

O Prod-8 foi o poço no qual não foi identificada a viabilidade para instalação de válvulas pelos dois métodos. Já o Prod-2 e o Prod-1 apresentaram válvulas de controle apenas pelo método AE, sendo que o Prod-2 foi o poço no qual houve a maior diferença entre número de válvulas.

Observa-se que a seleção das regiões selecionadas para iniciar o método AE resultou em regiões maiores que as regiões de controle de válvulas apontadas pelo MOD-P. O comprimento das regiões controladas por válvulas pelo AE foi de 17,89 m, enquanto que pelo método MOD-P foi de 4,90 m. Esta discrepância pode ser explicada pela maior flexibilidade das variáveis de decisão para o problema MOD-P.

Portanto, o comprimento das regiões controladas por válvulas de controle pode influenciar de modo significativo o VPL. A fixação das regiões do poço controladas por válvulas com base nas camadas do reservatório pode levar o método a sugerir camadas com maior comprimento do que o necessário. Por outro lado, a flexibilidade do método MOD-P em selecionar regiões para instalações ajudou o método a selecionar regiões mais refinadas do modelo.

Tabela 5-11: Variáveis otimizadas pelos métodos MOD-P e AE para o caso M-2b e modelo econômico ME-2a.

Projeto otimizado pelo método MOD-P							
Variáveis	Solução	Variáveis	Solução	Variáveis	Solução	Variáveis	Solução
n_v	10	$s_1^{2,3}$ (m)	29,41	$s_1^{3,5}$ (m)	50,97	$s_1^{1,7}$ (m)	24,24
$s_1^{1,1}$ (m)	19,77	$d_1^{2,3}$ (m)	2,17	$d_1^{3,5}$ (m)	3,95	$d_1^{1,7}$ (m)	7,84
$d_1^{1,1}$ (m)	7,22	$k_{opt}^{2,3}$ (anos)	11	$k_{opt}^{3,5}$ (anos)	13	$k_{opt}^{1,7}$ (anos)	12
$k_{opt}^{1,1}$ (anos)	8	$s_1^{1,5}$ (m)	24,20	$s_1^{1,6}$ (m)	23,30	$s_1^{1,9}$ (m)	16,72
$s_1^{1,3}$ (m)	25,06	$d_1^{1,5}$ (m)	7,68	$d_1^{1,6}$ (m)	7,78	$d_1^{1,9}$ (m)	4,13
$d_1^{1,3}$ (m)	4,35	$k_{opt}^{1,5}$ (anos)	12	$k_{opt}^{1,6}$ (anos)	9	$k_{opt}^{1,9}$ (anos)	11
$k_{opt}^{1,3}$ (anos)	14	$s_1^{2,5}$ (m)	49,00	$s_1^{2,6}$ (m)	31,09		
		$d_1^{2,5}$ (m)	1,98	$d_1^{2,6}$ (m)	1,95		
		$k_{opt}^{2,5}$ (anos)	16	$k_{opt}^{2,6}$ (anos)	5		

Projeto otimizado pelo método AE							
Variáveis	Solução	Variáveis	Solução	Variáveis	Solução	Variáveis	Solução
n_v	12	$s_1^{1,3}$ (m)	0,00	$s_1^{2,5}$ (m)	67,46	$s_1^{1,7}$ (m)	22,28
$s_1^{1,1}$ (m)	37,44	$d_1^{1,3}$ (m)	20,70	$d_1^{2,5}$ (m)	13,36	$d_1^{1,7}$ (m)	13,25
$d_1^{1,1}$ (m)	33,60	$k_{opt}^{1,3}$ (anos)	24	$k_{opt}^{2,5}$ (anos)	22	$k_{opt}^{1,7}$ (anos)	15
$k_{opt}^{1,1}$ (anos)	22	$s_1^{1,4}$ (m)	0,00	$s_1^{1,6}$ (m)	0	$s_1^{2,7}$ (m)	56,51
$s_1^{1,2}$ (m)	0,00	$d_1^{1,4}$ (m)	18,65	$d_1^{1,6}$ (m)	23,30	$d_1^{2,7}$ (m)	26,75
$d_1^{1,2}$ (m)	24,29	$k_{opt}^{1,4}$ (anos)	19	$k_{opt}^{1,6}$ (anos)	26	$k_{opt}^{2,7}$ (anos)	16
$k_{opt}^{1,2}$ (anos)	25	$s_1^{1,5}$ (m)	19,08	$s_1^{2,6}$ (m)	23,30	$s_1^{1,9}$ (m)	52,78
$s_1^{2,2}$ (m)	75,06	$d_1^{1,5}$ (m)	16,52	$d_1^{2,6}$ (m)	11,88	$d_1^{1,9}$ (m)	7,90
$d_1^{2,2}$ (m)	4,44	$k_{opt}^{1,5}$ (anos)	28	$k_{opt}^{2,6}$ (anos)	16	$k_{opt}^{1,9}$ (anos)	17
$k_{opt}^{2,2}$ (anos)	20						

Considerando os poços nos quais se obteve o mesmo número de válvulas pelos dois métodos, observa-se que, mesmo obtendo o mesmo número de válvulas, as válvulas de controle foram posicionadas em regiões diferentes na maioria dos casos. Apenas no Prod-6, as duas válvulas de controle sugeridas pelo MOD-P foram posicionadas no mesmo local em que foi sugerida a posição de uma válvula pelo AE.

Nos demais poços, obteve-se uma configuração de posicionamento de válvulas semelhante para os dois métodos. No Prod-5 e no Prod-6, duas válvulas sugeridas pelo MOD-P controlam uma região semelhante ao controle de uma válvula sugerida pelo AE. Portanto, em geral, os métodos de otimização apresentaram posicionamentos diferentes para as válvulas de controle, além de comprimentos diferentes.

Comparando-se o tempo de fechamento de cada válvula, observa-se que a otimização pelo AE sugeriu tempos de fechamento maiores que o ano 15. Enquanto isso, o método MOD-P sugeriu fechamentos a partir do ano 5. Além disso, para a solução do MOD-P, nenhuma válvula teve como tempo ótimo de fechamento um tempo superior ao ano 20, enquanto que a maioria dos tempos ótimos de fechamento obtidos pelo AE foram superiores ao ano 20. Em média o MOD-P sugere fechamentos em torno dos 11 anos, enquanto que para o AE a média é de 21 anos. Portanto, os métodos obtiveram uma resposta diferente também para o tempo de fechamento de válvulas.

Pode-se concluir que os métodos apresentaram diferentes características quanto ao número, posição e tempo de fechamento ótimo das válvulas. Considerando que os VPL encontrados foram diferentes para os dois casos em que foi constatada a viabilidade de usar mais válvulas, pode-se afirmar que o método MOD-P foi mais eficiente na busca do melhor posicionamento das válvulas. Tendo em vista as limitações do número de simulações impostas ao AE, do número de regiões de controle e do grande número de variáveis envolvidas no problema, nota-se que a otimização por métodos como algoritmo evolucionário podem levar a respostas subotimizadas.

5.2.2 Avaliação do desempenho dos métodos na busca da solução ótima

A Figura 5-38 mostra o resultado da função-objetivo de todas as simulações realizadas na otimização do exemplo E-2, modelo econômico ME-2a utilizando o método MOD-P. O VPL mostrado é o VPL da mudança sugerida na estratégia inicial. O número de cada simulação segue a sequência executada pelo método. Os quatro casos são apresentados, M-2a, M-2b, M-2c e M-2d. Apresenta-se também a divisão de cada estágio utilizado para os casos M-2a e M-2b com o objetivo de mostrar a evolução por indicador escolhido.

Observa-se que, para os casos M-2a e M-2b, o método MOD-P evolui com eficiência até encontrar a solução otimizada. Considerando o caso M-2a, do total de 191 simulações utilizadas,

141 simulações geraram um VPL maior do que o VPL da simulação anterior. Para o caso M-2b, 144 simulações das 218 utilizadas geraram um VPL maior do que o VPL da simulação anterior. Estes resultados mostram que 74% e 66% das simulações melhoraram a estratégia avaliada, para os casos M-2a e M-b, respectivamente. Portanto, os resultados mostram que o método MOD-P evoluiu de forma a evitar avaliações de estratégias com baixo potencial de melhorar a configuração de válvulas de controle.

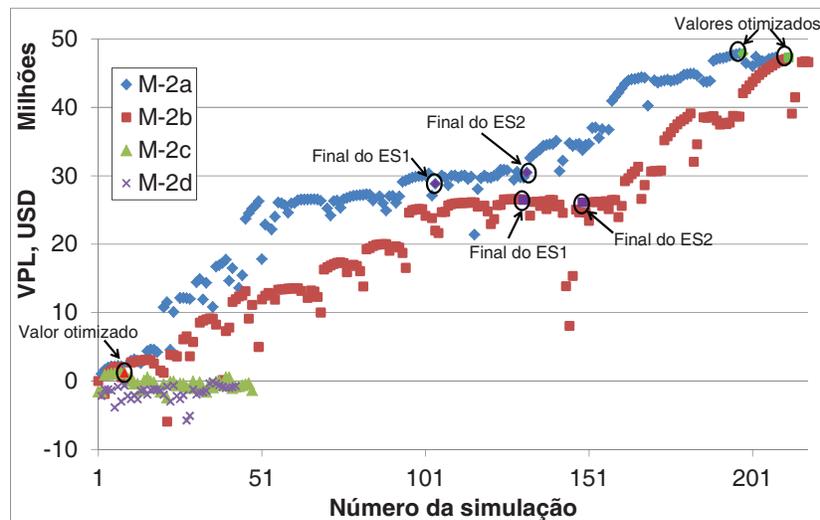


Figura 5-38: Evolução da função-objetivo do exemplo E-2 com modelo econômica ME-2a para o método de otimização MOD-P, considerando o VPL relativo à mudança na estratégia inicial.

Já para os casos M-2c e M-2d, os resultados mostram que a evolução não ocorreu de forma tão eficiente como nos casos M-2a e M-2b. Para o caso M-2c, apenas 9 das 49 simulações apontaram um resultado superior ao já encontrado em simulações anteriores, enquanto que no caso M-2d não houve melhora. Entretanto, observa-se que nesses casos não houve uma viabilidade para implantação de válvulas de controle.

O pior caso encontrado para o caso M-2c obteve um VPL abaixo do VPL da estratégia inicial em USD 2,44 milhões e para o caso M-2d um VPL de USD 5,75 milhões. Este resultado representa 1% e 2% do valor da estratégia inicial, para os casos M-2c e M-2d, respectivamente. Portanto, as buscas pela melhor estratégia foram realizadas em regiões do espaço de solução relativamente próximas do melhor resultado encontrado.

A análise da evolução dos estágios para os casos M-2a e M-2b mostra que houve uma diferença entre os resultados obtidos pelos diferentes indicadores utilizados. O ciclo intermediário não gerou resultados que melhorassem a estratégia, enquanto que os estágios ES1 e ES3 aumentaram de forma significativa o VPL da estratégia. Entretanto, observa-se que o número de simulações utilizado no ES2 foi menor que nos outros dois. Conclui-se que os indicadores utilizados no ES1 e ES3 foram mais eficientes no auxílio da busca da melhor resposta.

A Figura 5-39 à Figura 5-42 mostram a evolução do método AE na busca da solução ótima para o modelo econômico ME-2a. No eixo das abscissas encontra-se o número de cada simulação executada por ordem de simulação e no eixo das ordenadas o VPL da mudança sugerida na estratégia inicial. Para a Figura 5-39 e a Figura 5-40, apresenta-se também a correção realizada na solução encontrada pelo AE.

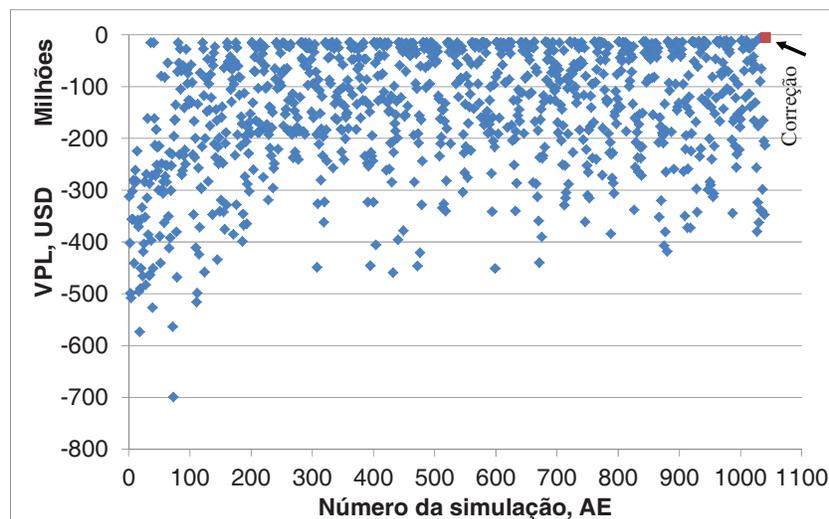


Figura 5-39: Evolução da função-objetivo do caso M-2a com modelo econômica ME-2a para o método de otimização AE, considerando o VPL relativo à mudança na estratégia inicial.

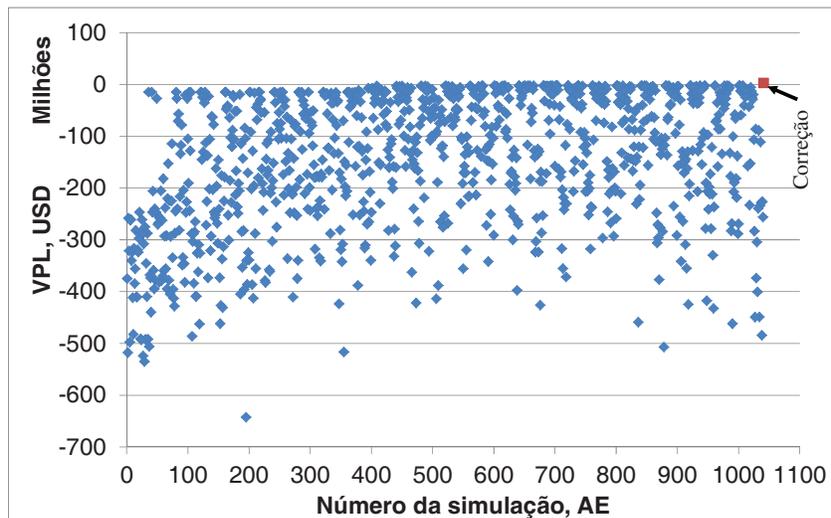


Figura 5-40: Evolução da função-objetivo do caso M-2b com modelo econômica ME-2a para o método de otimização AE, considerando o VPL relativo à mudança na estratégia inicial.

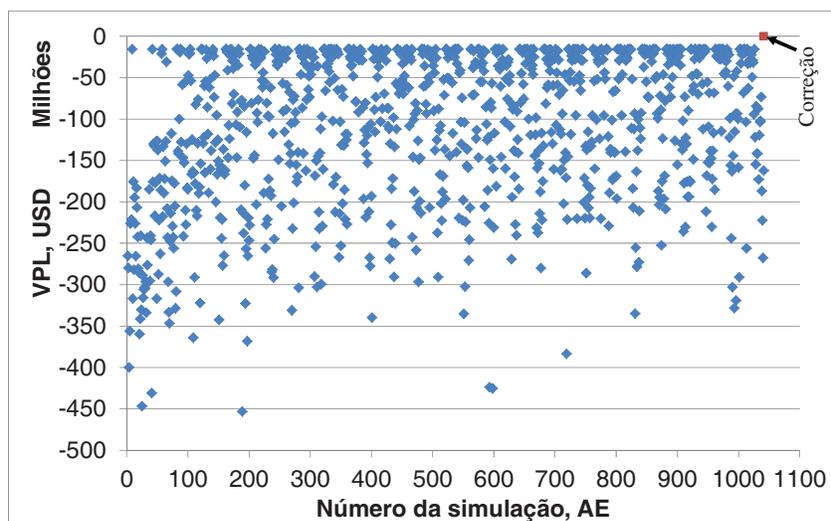


Figura 5-41: Evolução da função-objetivo do caso M-2c com modelo econômica ME-2a para o método de otimização AE, considerando o VPL relativo à mudança na estratégia inicial.

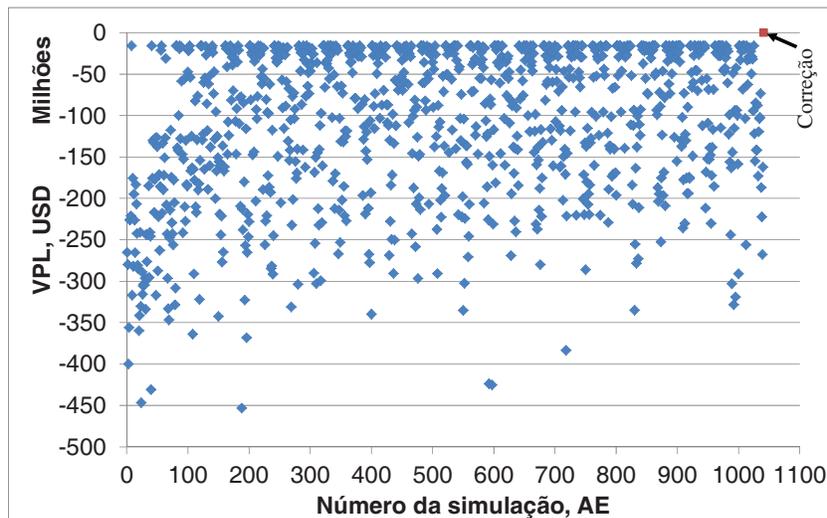


Figura 5-42: Evolução da função-objetivo do caso M-2d com modelo econômica ME-2a para o método de otimização AE, considerando o VPL relativo à mudança na estratégia inicial.

Em geral, observa-se que as mudanças na estratégia inicial apresentaram um VPL negativo. Para os casos M-2c e M-2d, os resultados mostram valores negativos em termos absolutos da ordem do VPL da estratégia inicial. Para os casos M-2a e M-2b, os valores absolutos das piores estratégias testadas chegam a 70% do valor da estratégia inicial. Estes valores mostram que o método AE gerou estratégias significativamente piores.

Um dos fatores para a geração de estratégias com VPL muito inferior ao ótimo é a possibilidade de geração de estratégias que podem fechar a produção do campo com baixo tempo de produção. Outros fatores, como o fechamento das melhores completações de forma antecipada e a pouca flexibilidade para alterar as regiões do poço controladas por válvulas, podem ser apontados como uma característica negativa do método que levaram ao resultado ruim.

Para o caso M-2c e M-2d, observa-se que não houve melhora do melhor indivíduo de cada geração até a correção realizada, sendo o melhor indivíduo aquele com todas as completações abertas até o final da produção do campo. Para os casos M-2a e M-2b a melhora do melhor indivíduo ocorreu de forma gradual. Comparando o melhor indivíduo da primeira geração com o melhor indivíduo da última geração, o crescimento no VPL foi de USD 8,81 milhões e USD 12,56 milhões para os casos M-2a e M-2b, respectivamente. Após a correção, o VPL foi aumentado em USD 0,78 milhões e USD 4,74 milhões para os casos M-2a e M-2b, respectivamente. Portanto, o

método conseguiu evoluir a melhor resposta ao longo do processo, mas não o suficiente para gerar uma estratégia com VPL próximo ao encontrado pelo MOD-P.

A otimização dos casos M-2b, M-2c e M-2d geraram uma alternativa que foi melhor ou igual à estratégia inicial. Porém, para o caso M-2a o melhor indivíduo não superou o VPL da estratégia inicial. A melhor alternativa gerada obteve como melhor solução 21 válvulas distribuídas em 8 poços produtores. Portanto, o resultado ficou significativamente diferente do resultado encontrado com o MOD-P, que foi de 11 válvulas para este caso.

Percebe-se ainda que, considerando as melhores respostas obtidas por ambos os métodos de otimização e comparando com os resultados das piores estratégias simuladas, a variação do VPL com estratégias positivas é significativamente menor do que a variação do VPL com estratégias negativas. Portanto, montar o problema com muitas variáveis de controle que podem ser controladas durante toda a vida útil do campo, pode gerar um conjunto significativamente grande de estratégias com baixo potencial de aplicação.

Para exemplificar o desenvolvimento seguido pelo método MOD-P, a Tabela 5-12 à Tabela 5-14 mostram todas as simulações executadas para a otimização do caso M-2a para o modelo econômico ME-2a. Nas duas primeiras colunas são mostrados os estágios em que foram executadas as simulações e o número da simulação, respectivamente. As colunas 3 e 4 mostram o poço e a *RMP* escolhida para a análise. Na coluna 5 encontra-se a informação sobre se a simulação obteve sucesso para encontrar uma região para aplicação de válvulas de controle. Nas duas últimas colunas encontram-se o tempo de fechamento que inicia a otimização do controle e o tempo ótimo encontrado, caso a análise tenha obtido êxito na busca por região para aplicar válvulas.

Tabela 5-12: Simulações executadas pelo MOD-P para avaliar a potencialidade de regiões na otimização do M-2a para o ME-2a (parte 1).

Estágio	Número da simulação	Poço	Regiões	Obteve sucesso?	Tempo inicial de análise (anos)	Tempo ótimo de fechamento (anos)
1	2	Prod-1	$RMP^{9,1}$	sim	10	5
1	10	Prod-6	$RMP^{9,6}$	sim	10	9
1	14	Prod-4	$RMP^{9,4}$	sim	11	10
1	18	Prod-4	$RMP^{7,4} RMP^{8,4}$	sim	11	10
1	22	Prod-9	$RMP^{9,9}$	sim	11	10
1	26	Prod-9	$RMP^{8,9}$	sim	11	10
1	30	Prod-8	$RMP^{6,8} RMP^{7,8} RMP^{8,8} RMP^{9,8}$	não	11	-
1	31	Prod-6	$RMP^{8,6}$	sim	12	9
1	37	Prod-8	$RMP^{6,8} RMP^{7,8} RMP^{8,8} RMP^{9,8}$	não	11	-
1	38	Prod-8	$RMP^{7,8} RMP^{8,8} RMP^{9,8}$	não	12	-
1	39	Prod-6	$RMP^{6,6} RMP^{7,6}$	sim	12	9
1	46	Prod-8	$RMP^{6,8} RMP^{7,8} RMP^{8,8} RMP^{9,8}$	não	11	-
1	47	Prod-8	$RMP^{7,8} RMP^{8,8} RMP^{9,8}$	não	12	-
1	48	Prod-2	$RMP^{9,2}$	não	13	-
1	49	Prod-1	$RMP^{18,1}$	não	14	-
1	50	Prod-8	$RMP^{18,8}$	não	15	-
1	51	Prod-8	$RMP^{16,8} RMP^{17,8} RMP^{18,8}$	não	16	-
1	52	Prod-6	$RMP^{17,6}$	não	17	-
1	53	Prod-6	$RMP^{17,6}$	não	18	-
1	54	Prod-5	$RMP^{17,5} RMP^{18,5}$	sim	19	14
1	62	Prod-8	$RMP^{18,8}$	não	15	-
1	63	Prod-8	$RMP^{16,8} RMP^{17,8} RMP^{18,8}$	não	16	-
1	64	Prod-6	$RMP^{17,6}$	não	17	-
1	65	Prod-6	$RMP^{17,6}$	não	18	-
1	66	Prod-2	$RMP^{17,2} RMP^{18,2}$	não	19	-
1	67	Prod-3	$RMP^{9,3}$	sim	20	13
1	77	Prod-1	$RMP^{18,1}$	não	14	-
1	78	Prod-8	$RMP^{18,8}$	não	15	-
1	79	Prod-8	$RMP^{16,8} RMP^{17,8} RMP^{18,8}$	não	16	-
1	80	Prod-6	$RMP^{17,6}$	não	17	-
1	81	Prod-6	$RMP^{17,6}$	não	18	-
1	82	Prod-2	$RMP^{17,2} RMP^{18,2}$	não	19	-
1	83	Prod-4	$RMP^{18,4}$	não	20	-
1	84	Prod-3	$RMP^{8,3}$	sim	21	13

Tabela 5-13: Simulações executadas pelo MOD-P para avaliar a potencialidade de regiões na otimização do M-2a para o ME-2a (parte 2).

Estágio	Número da simulação	Poço	Regiões	Obteve sucesso?	Tempo inicial de análise (anos)	Tempo ótimo de fechamento (anos)
1	95	Prod-1	$RMP^{18,1}$	não	14	-
1	96	Prod-8	$RMP^{18,8}$	não	15	-
1	97	Prod-8	$RMP^{16,8}$ $RMP^{17,8}$ $RMP^{18,8}$	não	16	-
1	98	Prod-6	$RMP^{18,6}$	não	17	-
1	99	Prod-6	$RMP^{18,6}$	não	18	-
1	100	Prod-2	$RMP^{17,2}$ $RMP^{18,2}$	não	19	-
1	101	Prod-4	$RMP^{18,4}$	não	20	-
1	102	Prod-4	$RMP^{18,4}$	não	21	-
1	103	Prod-4	$RMP^{16,4}$ $RMP^{17,4}$ $RMP^{18,4}$	não	22	-
1	104	Prod-7	$RMP^{18,7}$	não	26	-
2	105	Prod-8	$RMP^{13,8}$ $RMP^{14,8}$ $RMP^{15,8}$ $RMP^{16,8}$ $RMP^{17,8}$ $RMP^{18,8}$	não	11	-
2	106	Prod-8	$RMP^{7,8}$ $RMP^{8,8}$ $RMP^{9,8}$	não	12	-
2	107	Prod-1	$RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	13	-
2	108	Prod-1	$RMP^{18,1}$	não	14	-
2	109	Prod-8	$RMP^{18,8}$	não	15	-
2	110	Prod-9	$RMP^{18,9}$	não	16	-
2	110	Prod-6	$RMP^{18,6}$	não	17	-
2	112	Prod-6	$RMP^{18,6}$	não	18	-
2	113	Prod-5	$RMP^{16,6}$	sim	19	19
2	116	Prod-7	$RMP^{18,7}$	não	20	-
2	117	Prod-4	$RMP^{18,4}$	não	21	-
2	118	Prod-4	$RMP^{15,4}$ $RMP^{16,4}$ $RMP^{17,4}$ $RMP^{18,4}$	não	22	-
2	119	Prod-7	$RMP^{18,7}$	não	26	-
2	120	Prod-6	$RMP^{2,6}$	não	27	-
3	121	Prod-1	$RMP^{8,1}$	sim	11	5
3	132	Prod-1	$RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	13	-
3	133	Prod-1	$RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	14	-
3	134	Prod-1	$RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	15	-
3	135	Prod-1	$RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	16	-
3	136	Prod-8	$RMP^{16,8}$ $RMP^{17,8}$ $RMP^{18,8}$	não	17	-
3	137	Prod-1	$RMP^{15,1}$ $RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	18	-
3	138	Prod-1	$RMP^{15,1}$ $RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	19	-
3	139	Prod-5	$RMP^{6,5}$ $RMP^{7,5}$ $RMP^{8,5}$ $RMP^{9,5}$	sim	20	19

Tabela 5-14: Simulações executadas pelo MOD-P para avaliar a potencialidade de regiões na otimização do M-2a para o ME-2a (parte 3).

Estágio	Número da simulação	Poço	Regiões	Obteve sucesso?	Tempo inicial de análise (anos)	Tempo ótimo de fechamento (anos)
3	143	Prod-6	$RMP^{17,6}$ $RMP^{18,6}$	não	20	-
3	144	Prod-7	$RMP^{7,7}$ $RMP^{8,7}$ $RMP^{9,7}$	sim	21	12
3	156	Prod-1	$RMP^{18,1}$	não	13	5
3	157	Prod-1	$RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	14	-
3	158	Prod-1	$RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	15	-
3	159	Prod-1	$RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	16	-
3	160	Prod-1	$RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	17	-
3	161	Prod-1	$RMP^{15,1}$ $RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	18	-
3	162	Prod-1	$RMP^{15,1}$ $RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	19	-
3	163	Prod-6	$RMP^{17,6}$ $RMP^{18,6}$	não	20	-
3	164	Prod-2	$RMP^{9,2}$	não	21	-
3	165	Prod-6	$RMP^{5,6}$	sim	22	20
3	170	Prod-6	$RMP^{17,6}$ $RMP^{18,6}$	não	21	-
3	171	Prod-6	$RMP^{16,6}$ $RMP^{17,6}$ $RMP^{18,6}$	não	22	-
3	173	Prod-6	$RMP^{16,6}$ $RMP^{17,6}$ $RMP^{18,6}$	não	23	-
3	173	Prod-7	$RMP^{7,7}$ $RMP^{8,7}$ $RMP^{9,7}$	sim	25	17
3	184	Prod-8	$RMP^{16,8}$ $RMP^{17,8}$ $RMP^{18,8}$	não	18	-
3	185	Prod-1	$RMP^{15,1}$ $RMP^{16,1}$ $RMP^{17,1}$ $RMP^{18,1}$	não	19	-
3	186	Prod-6	$RMP^{17,6}$ $RMP^{18,6}$	não	20	-
3	187	Prod-6	$RMP^{17,6}$ $RMP^{18,6}$	não	21	-
3	188	Prod-6	$RMP^{16,6}$ $RMP^{17,6}$ $RMP^{18,6}$	não	22	-
3	189	Prod-6	$RMP^{16,6}$ $RMP^{17,6}$ $RMP^{18,6}$	não	25	-
3	190	Prod-6	$RMP^{16,6}$ $RMP^{17,6}$ $RMP^{18,6}$	não	26	-
3	191	Prod-6	$RMP^{16,6}$ $RMP^{17,6}$ $RMP^{18,6}$	não	27	-

Os resultados mostram que a eficiência das avaliações dos indicadores variou ao longo da otimização. Inicialmente, os indicadores apontaram válvulas de forma mais eficiente. Dos 12 primeiros testes, 9 indicaram com sucesso o fechamento de regiões do poço. A partir da simulação número 46, o processo tornou-se menos eficiente, sendo necessárias mais avaliações para obter uma região que teve seu tempo de fechamento alterado. Entre o final do ES1 e o início do ES2, o método avaliou 17 *RMP* sem obter sucesso na identificação de regiões que apresentaram

viabilidade. No início do estágio ES3, o método tornou-se mais eficiente do que foi no estágio ES2, mas continuou sem a mesma eficiência do ES1. Portanto, o método foi mais eficiente no começo das análises, tendo uma mais baixa eficiência no estágio ES2 e retornando a ser mais eficiente no estágio ES3.

Uma análise da diferença entre o tempo inicial de otimização de controle e o tempo ótimo de fechamento mostra, que em 10 das 16 simulações que geraram uma avaliação de sucesso, a diferença foi menor ou igual a 3 anos. A maior diferença encontrada foi de 9 anos. Portanto, apesar de em alguns casos o método não identificar de forma eficiente o tempo para avaliar as *RMP*, na maior parte dos testes o método conseguiu uma boa aproximação para o tempo ótimo de fechamento já no início do processo de otimização.

O estágio ES2 apresentou apenas um fechamento *RMP* com viabilidade econômica e foi o que menos contribuiu para o aumento do VPL e número de válvulas. Os indicadores do estágio ES1 e estágio ES2 apresentaram 11 e 5 fechamentos viáveis, respectivamente. Entretanto, como uma alteração do tipo de indicador utilizado em cada estágio poderia mudar a avaliação dos indicadores, não é possível afirmar que o indicador do estágio ES2 não seja viável.

Observa-se que, apesar de 16 fechamentos de regiões terem sido viáveis, apenas 11 válvulas de controle foram atribuídas para executar essas operações. Este fato ocorreu devido o fechamento de regiões subsequentes que fecharam na mesma data terem sido avaliadas em diferentes ciclos. Para o Prod-1, Prod-3, Prod-4, Prod-5, Prod-6 e Prod-9 pelo menos uma região de atuação de válvula de controle foram definidas desta forma. Por outro lado, o uso do indicador de projeto também auxiliou no fechamento de mais de uma *RMP* em um mesmo CE. Portanto, o uso do indicador de projeto atingiu o objetivo de agregar *RMP* para formar regiões de controle maiores, porém em alguns casos o indicador mais o critério adotado não se mostraram eficientes e o algoritmo executou mais de um CE para determinar o posicionamento de uma válvula de controle.

O método MOD-P testou pelo menos uma *RMP* em todos os poços produtores. Entretanto, em dois poços, Prod-2 e Prod-8, a aplicação de válvulas não obteve sucesso. No estágio ES1, o Prod-8 foi testado em diferentes tempos e em diferentes *RMP*, o que pode ter atrasado o término da otimização. O Prod-2 foi o poço menos testado, com 5 testes executados. Portanto, o uso dos

indicadores classificatórios como única variável de decisão entre o procedimento P2 e P3 pode diminuir a eficiência do MOD-P em alguns casos.

Pode-se concluir que a evolução do método MOD-P possui características que o tornam menos e mais eficiente ao longo do processo de avaliação. O uso dos indicadores associados aos critérios para eliminação, classificação e combinação de regiões auxiliou o método a escolher regiões com maior potencial, visto que regiões que se revelaram viáveis para implantação de válvulas foram escolhidas. Entretanto, os indicadores também apontaram poços e regiões que não apresentaram viabilidade para aplicação de válvulas de controle. Portanto, a escolha dos indicadores e critérios para serem aplicados em cada estágio pode influenciar na eficiência da metodologia.

5.2.3 Impactos da otimização do número e da posição das válvulas de controle no desempenho do reservatório

Nesta seção, são apresentadas as principais mudanças na previsão do desempenho econômico e produtivo do campo e poços produtores provocadas pela otimização realizada pelo método MOD-P para os casos M-2a e M-2b. Inicialmente, são apresentados os resultados para o campo e em seguida para os poços produtores. Os resultados do caso M-2a serão apresentados com mais detalhes.

Os resultados apresentados na Tabela 5-15 mostram a previsão para os indicadores de campo antes e após a otimização por meio dos dois métodos utilizados. Observa-se uma melhora significativa nos indicadores técnicos e econômicos da estratégia após a otimização.

A produção total de óleo foi aproximadamente 3% maior para os dois casos otimizados pelo MOD-P, enquanto que a produção total de água 14% e 12% menor para os casos M-2a e M-2b, respectivamente. Portanto, o controle com as válvulas de controle trouxe benefícios tanto para aumentar as receitas quanto para diminuir os custos de produção. Já a otimização do problema AE-2 mostra que a otimização não conseguiu obter melhoras da mesma ordem de grandeza, mas a característica de aumentar as receitas e diminuir os custos simultaneamente se manteve.

Tabela 5-15: Indicadores técnicos e econômicos das soluções otimizadas para os casos M-2a e M-2b.

Caso	Problema	Produção total de óleo, milhões std m ³	Varição da produção total de óleo (%)	Produção total de água, milhões std m ³	Varição da produção total de água (%)	Investimento em válvulas, milhões USD	VPL, milhões USD
M-2a	Base	50,04	-	25,17	-	0,00	0,00
	MOD-P2	51,54	+3,00	21,55	-14,38	8,20	47,86
	AE-2	50,04	0,00	25,17	0,00	0,00	0,00
M-2b	Base	48,33	-	25,25	-	0,00	0,00
	MOD-P2	49,75	+3,16	22,23	-11,96	7,20	47,29
	AE-2	48,74	+2,03	23,50	-6,93	9,50	4,74

A Figura 5-43 e a Figura 5-44 mostram as produções anuais das estratégias otimizadas e das estratégias iniciais, além da diferença no fluxo de caixa líquido anual descontado entre as estratégias otimizadas e as estratégias iniciais de cada caso. No eixo das abscissas encontra-se a produção do campo durante toda a sua vida útil. No eixo das ordenadas principal, estão a vazão média diária de cada ano de produção para o óleo e água em condições de superfície. Os resultados mostram uma mudança significativa nos valores previstos para os indicadores de produção.

Observa-se que os benefícios do uso das válvulas de controle ocorreram durante a maior parte do tempo de produção. Considerando o caso M-2a, o resultado foi um fluxo de caixa líquido maior durante 21 dos 30 anos, sendo que por 5 anos o fluxo de caixa líquido foi similar. Já para o caso M-2b, o período que de maior FCL foi maior, 23 anos. Para a produção de água, nos dois casos observou-se uma menor produção de água desde o segundo ano após o acionamento da primeira válvula de controle. Considerando os últimos 5 anos da vida útil do campo, observa-se que uma maior produção de óleo na estratégia inicial do que na estratégia otimizada. Portanto, a antecipação na produção de óleo afeta de forma relevante a produção no final da vida útil do campo, porém a antecipação do óleo se mostrou economicamente viável.

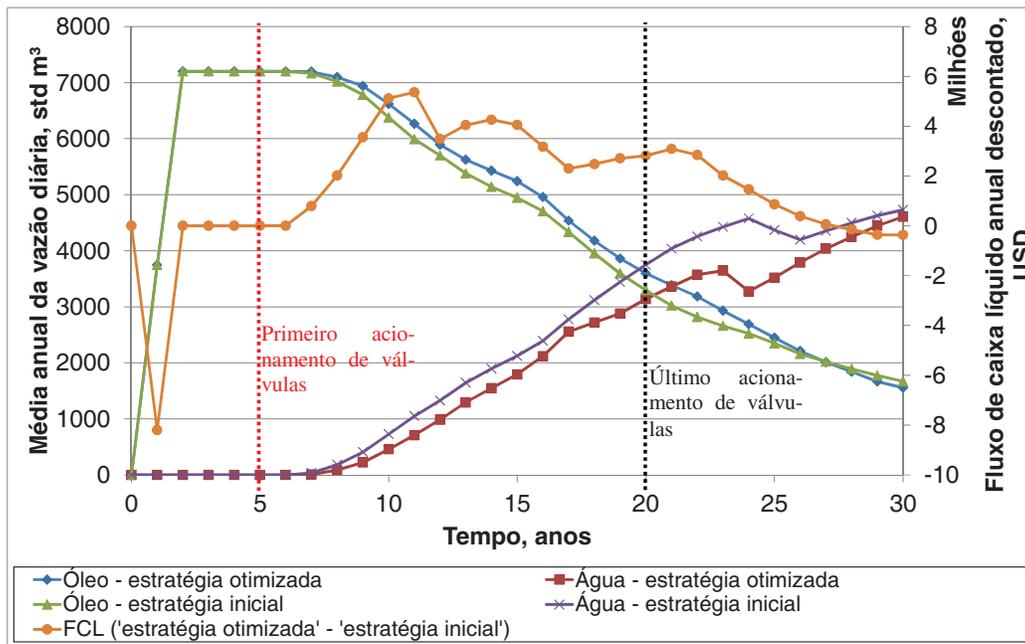


Figura 5-43: Previsão da produção do campo para o caso M-2a e modelo econômico ME-2a.

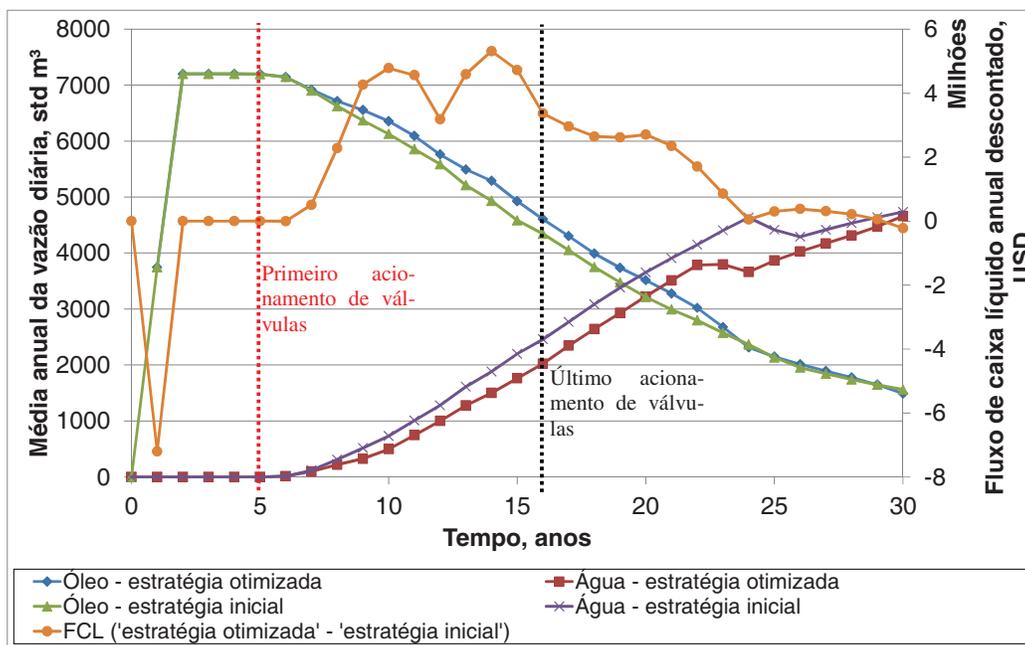


Figura 5-44: Previsão da produção do campo para o caso M-2b e modelo econômico ME-2a.

Para os dois casos, observam-se mudanças nas curvas de produção 2 anos após o acionamento da primeira válvula. Este resultado indica que o acionamento da válvula de controle não mudou a produção do campo imediatamente e que só após 2 anos os resultados começaram a ocorrer. Observa-se, também para os dois casos, que as curvas de FCL diminuíram a tendência de queda da diferença da previsão do fluxo de caixa. Entretanto, para o caso M-2a, a diferença do FCL voltou a crescer, enquanto que para o caso M-2b houve apenas uma redução da queda. Isso mostra que o acionamento das válvulas de controle ainda afetou de forma significativa os indicadores econômicos.

A Tabela 5-16 apresenta indicadores econômicos no final da vida útil de cada poço produtor para o caso M-2a, utilizando o modelo econômico ME-2a. Os resultados de cada poço são divididos entre os resultados para a estratégia inicial e a estratégia otimizada pelo MOD-P. Os indicadores utilizados são: a produção de óleo acumulada, a produção de água acumulada e o VPL do poço produtor. Apresenta-se também a variação do VPL

Tabela 5-16: Indicadores econômicos dos produtores para o caso M-2a, modelo econômico ME-2a.

Poço	Problema	Produção total de óleo, milhões std m ³	Variação da produção total de óleo (%)	Produção total de água, milhões std m ³	Variação da produção total de água (%)	Investimento em válvulas, milhões USD	VPL, milhões USD	Variação do VPL (%)
Prod-1	Inicial	3,52	+2,63	3,42	-21,55	-	421	+3,55
	MOD-P2	3,61		2,68		1,30	436	
Prod-2	Inicial	5,71	-0,48	2,81	+0,99	-	553	-0,35
	MOD-P2	5,69		2,83		0,00	551	
Prod-3	Inicial	7,55	+2,13	1,22	-13,18	-	685	+0,73
	MOD-P2	7,71		1,06		1,00	690	
Prod-4	Inicial	5,53	+4,68	3,38	-8,26	-	556	+3,82
	MOD-P2	5,79		2,88		1,00	578	
Prod-5	Inicial	6,02	+0,46	2,68	-29,11	-	609	-0,08
	MOD-P2	6,04		1,90		1,60	609	
Prod-6	Inicial	5,19	+7,76	3,40	-27,63	-	527	+7,06
	MOD-P2	5,60		2,46		1,30	565	
Prod-7	Inicial	6,94	+8,65	1,80	-40,77	-	658	+3,52
	MOD-P2	7,54		1,06		1,30	681	
Prod-8	Inicial	4,64	-0,79	3,03	-0,96	-	481	-0,69
	MOD-P2	4,60		3,00		0,00	477	
Prod-9	Inicial	4,93	+0,30	3,70	-0,39	-	526	+0,77
	MOD-P2	4,95		3,67		1,00	530	

Neste caso, o VPL do poço produtor é calculado a partir de um fluxo de caixa líquido que leva em consideração apenas a produção e os custos exclusivos de cada poço. Portanto, custos relativos à injeção de água e a custos e investimentos do campo como um todo não são inseridos no fluxo de caixa líquido dos produtores.

Observa-se que a implantação de válvulas de controle pode alterar de forma significativa não só os poços produtores nos quais as válvulas de controle são instaladas, como também os poços que não apresentaram viabilidade de implantação. As variações encontram-se na faixa entre +8,7% e -0,8%, para o óleo. Para a água a máxima variação no volume de água foi de -41%, enquanto houve uma variação positiva de até 1%. Já o VPL dos poços variou entre +7% e -0,7%. Portanto, a estratégia otimizada apresentou variações na produção de água mais significativas, enquanto que a variação da produção de óleo e do VPL foi menor.

Os resultados mostram que todos os poços em que válvulas de controle foram viáveis apresentaram uma melhora na produção de óleo. Já os poços que não apresentaram viabilidade para uso de válvulas de controle obtiveram uma queda na produção de óleo, embora relativamente menor do que as variações positivas de óleo nos outros poços. Portanto, a inclusão de válvulas de controle alterou de forma positiva os poços com válvulas de controle e de forma negativa a produção dos outros poços.

A produção acumulada de água no final da vida útil dos poços sofreu variações de até -40,77%, sendo que apenas em um poço, Prod-2, houve um aumento na produção total de água. Observa-se ainda que o poço Prod-9 obteve uma redução de menos de 1% na produção de água, mesmo sendo apontada a viabilidade de uso de uma válvula de controle. Portanto, os poços com válvulas de controle podem ter diferentes desempenhos com relação à diferença na produção de água entre as estratégias com e sem válvulas. Entretanto, observa-se uma diferença maior nos poços que obtiveram melhores desempenhos neste indicador do que nos poços que não apresentaram as mesmas melhoras.

O resultado final em termos de VPL mostra que a maior parte dos poços obteve um melhor desempenho do VPL. Por outro lado, os poços sem válvulas de controle apresentaram VPL menor na estratégia otimizada do que na estratégia inicial. Além disso, observa-se que o Prod-5 também apresentou uma queda no VPL, mesmo tendo apresentado viabilidade para implantação

do maior número de válvulas. Este resultado mostra que a influência do acionamento das outras válvulas de controle no VPL do Prod-5 foi significativa, já que a inclusão das válvulas de controle foi positiva para o desempenho do campo, mas não o suficiente para aumentar o VPL em relação à estratégia inicial. Entretanto, observa-se que as variações negativas são da ordem de 1%, enquanto que as variações positivas são mais significativas. Pode-se concluir que a inclusão de válvulas de controle em 1 poço impactou o desempenho econômico de outros poços do campo, sendo que as alterações em conjunto mostraram um viés de aumento do VPL.

A Figura 5-45 mostra a diferença do fluxo de caixa líquido anual entre a estratégia otimizada e a estratégia inicial para todos os poços. Observa-se que todos os poços da estratégia otimizada que apresentaram viabilidade de aplicação de válvulas de controle têm um período que apresentam um desempenho melhor que a estratégia inicial e outro período com desempenho pior. Observa-se que a diferença no FCL se inicia dois anos após o primeiro acionamento e se estende até o final da vida útil do campo. Os poços que não apresentaram viabilidade de aplicação de válvulas de controle, Prod-2 e Prod-8, apresentam uma diferença menor que os outros poços, e com viés negativo. Portanto, a inclusão de válvulas de controle afetou o FCL de todos os poços produtores por um período significativo da sua produção.

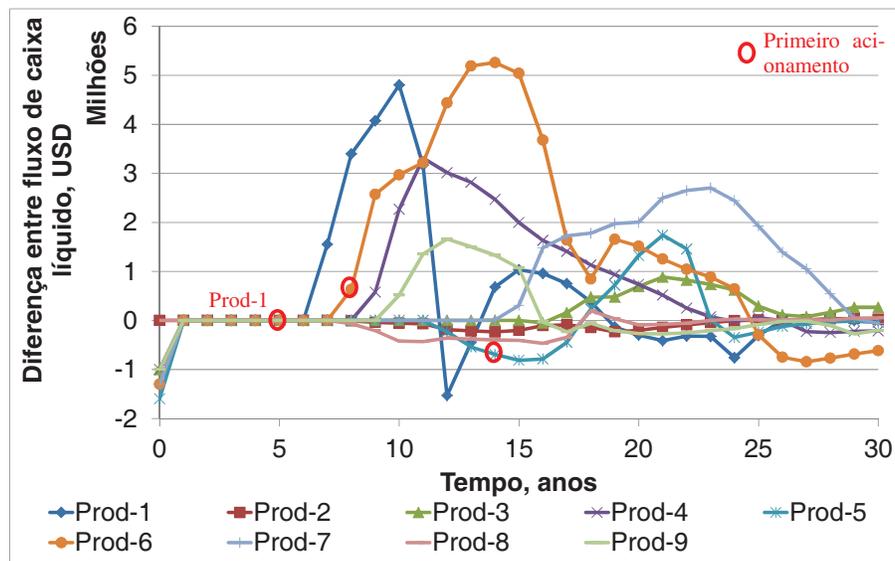


Figura 5-45: Diferença entre o fluxo de caixa líquido anual descontado da estratégia otimizada e da estratégia inicial para o caso M-2a, utilizando o modelo econômico M-2a.

A análise das alterações no fluxo de caixa com o tempo de acionamento da primeira válvula em um poço mostra que essas alterações podem ocorrer tanto após o acionamento da válvula no próprio poço como pode acontecer em um tempo posterior. Observando o comportamento da curva do Prod-1, observa-se que o FCL sofreu alterações após dois anos do acionamento da primeira válvula. Por outro lado, nota-se que a curva do Prod-6 mostra alterações positivas no fluxo de caixa antes mesmo do acionamento da primeira válvula no mesmo poço. Já para o Prod-5, nota-se uma variação negativa por um período de 3 anos antes do acionamento das válvulas e que a curva ganha uma inclinação positiva no ano seguinte após o acionamento. Portanto, o impacto do fechamento de uma válvula de controle pode ocorrer em períodos diferentes do tempo de acionamento da válvula, sendo que esse impacto pode afetar outros poços do campo.

Observa-se também que as curvas dos poços que apresentaram viabilidade para aplicação de válvulas têm a característica de declínio na sua parte final. Na maior parte dos poços, este declínio faz com que no final da vida útil do campo os poços da estratégia inicial apresentem FCL superior neste período. Portanto, o acionamento de válvulas de controle tende a melhorar o desempenho dos poços em períodos próximos ao do acionamento e a piorar o desempenho em períodos posteriores.

A Figura 5-46 mostra a diferença entre as vazões médias diárias de cada ano de produção de óleo entre os poços da estratégia otimizada e da estratégia inicial. Observa-se que comportamento das curvas é similar ao comportamento das curvas apresentadas na Figura 5-45 e o coeficiente de correlação entre as duas curvas para cada poço é maior que 0,7 em todos os poços. Portanto, as conclusões tomadas na análise da diferença entre os FCL de cada poço podem ser verificadas em relação às curvas da diferença entre as vazões diárias médias de óleo.

A Figura 5-47 mostra a diferença entre as vazões médias diárias de cada ano de produção de água entre os poços da estratégia otimizada e da estratégia inicial. Observa-se que uma diferença significativa entre as partes das curvas que mostram uma redução na vazão de água e as partes das curvas que mostram um aumento da produção. As vazões de água foram reduzidas na maior parte dos poços e por toda a vida útil do campo. Entretanto, a diferença tende a reduzir no final da vida útil do campo. Para os poços em que não houve viabilidade para aplicação de válvulas, não foi observada uma diferença significativa na vazão de água. Portanto, a produção de água

durante toda vida útil dos poços é significativamente reduzida nos poços com válvulas de controle.

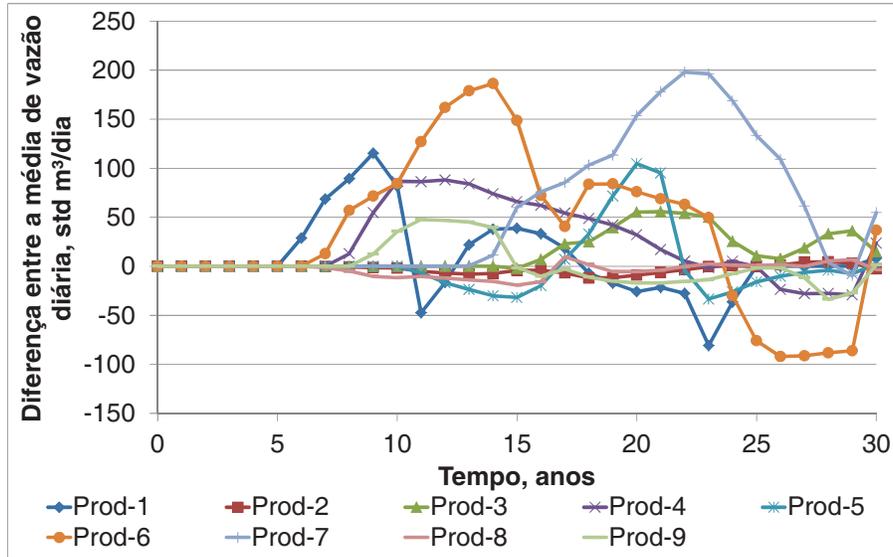


Figura 5-46: Diferença entre as médias da vazão diária de óleo obtidas no final de cada ano de produção para o caso M-2a.

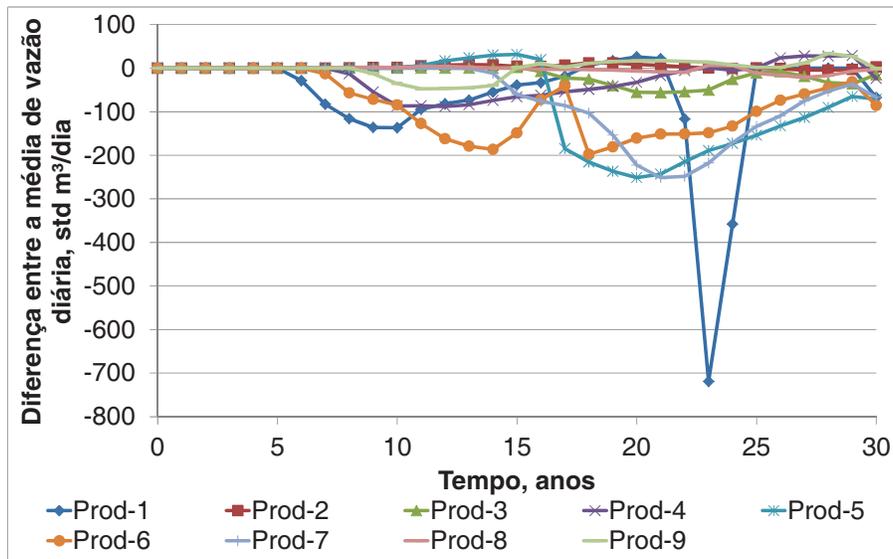


Figura 5-47: Diferença entre as médias da vazão diária de água obtidas no final de cada ano de produção para o caso M-2a.

Conclui-se da análise do desempenho econômico que a inclusão de válvulas de controle alterou de forma significativa a produção e o fluxo de caixa do campo e de poços. A alteração trouxe vantagens econômicas como maior produção de óleo, antecipação da produção de óleo e redução da produção de água. Por outro lado, poços que não apresentaram viabilidade de uso de válvulas de controle obtiveram um desempenho inferior ao observado na estratégia inicial devido à influência causada pela operação em poços com válvulas. As maiores mudanças foram observadas nos indicadores de produção de água chegando a uma redução de 40% da vazão de água em alguns poços, além da redução da produção de água durante a maior parte da vida útil do campo.

5.2.4 Avaliação dos indicadores ao longo da otimização do problema MOD-P2

Nesta seção, é realizada uma análise para avaliar o uso dos indicadores na otimização realizada pelo método MOD-P para o problema MOD-P2. O objetivo desta análise é mostrar como os indicadores restringiram a busca no processo de otimização. Na primeira parte desta seção, serão mostrados os indicadores relativos à estratégia inicial do caso M-2a. Uma segunda parte apresentará a evolução dos indicadores após a inclusão de válvulas de controle. Com isso, pretende-se avaliar de forma geral como os indicadores evoluíram durante o processo de otimização.

5.2.4.1 Avaliação dos indicadores da estratégia inicial

Nesta seção são apresentados os indicadores de campo, de poço e região, utilizados no método MOD-P para avaliar a estratégia inicial e apontar as regiões com maior potencial para aplicação de válvulas de controle. Os indicadores serão apresentados seguindo a sequência: indicadores classificatórios, eliminatórios e de projeto. Portanto, são apresentados inicialmente os indicadores eliminatórios I_1 , para o campo, I_2 e I_3 , para campo, poço e região, e I_4 para poço. Em seguida os indicadores classificatórios I_6 e I_2 para região e I_7 para região. Por último será apresentado o indicador de projeto I_5 .

O indicador I_1 apontou a viabilidade de aplicação de válvulas de controle para todos os casos do exemplo E-2. O menor VPL identificado foi o da estratégia do caso M-2c e foi igual a USD 158 milhões. Considerando o investimento necessário para a primeira válvula de USD 1 milhão, observa-se que o VPL é 158 vezes maior, sendo que o critério C_1 determina que para não ter

viabilidade, o VPL precisa ser inferior a 10 vezes o valor da válvula de controle. Portanto, este indicador permite que a otimização pelo MOD-P seja iniciada.

A Figura 5-48 mostra os indicadores I2 e I3 para o campo. Os indicadores estão limitados no gráfico a valores menores que 1,5 com o objetivo de dar ênfase aos valores próximos aos critérios adotados. Entretanto, foram observados valores superiores. Observa-se que o indicador I2 apresenta uma queda constante a partir do quarto ano de produção. Esse resultado indica que o FCL do campo apresenta uma variação anual negativa durante a maior parte da sua vida útil. Já o indicador I3 mostra que a produção de água só iniciou a partir do oitavo ano de produção. Após o oitavo ano, o indicador I3 diminuiu ao longo do tempo, mas só teve seu valor próximo ao valor do critério C3 após o ano 24. Portanto, observa-se que após o início da produção de água, a produção aumentou a cada ano, mas a variação anual foi cada vez menor.

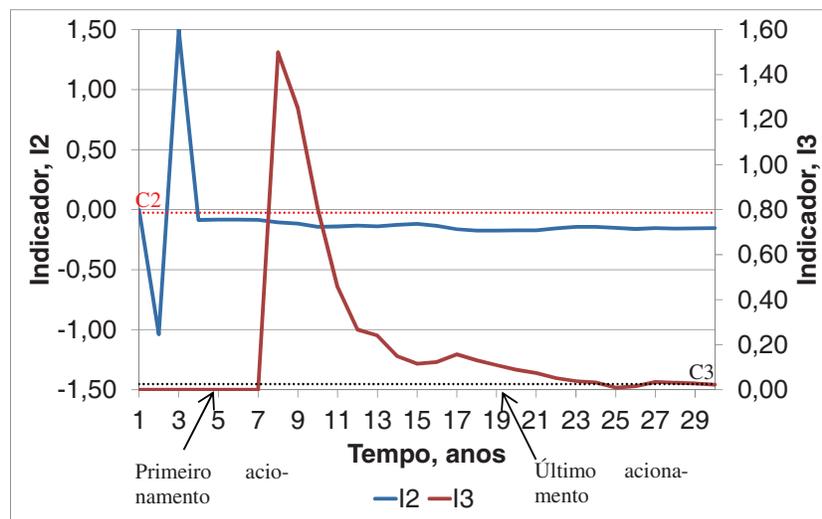


Figura 5-48: Indicadores I2 e I3 da estratégia inicial para o campo no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

A combinação dos dois indicadores mostra que, a partir do oitavo ano de produção, o método MOD-P mostra um potencial para aplicação de válvulas de controle em todos os anos de produção, com exceção do ano 25. Considerando que o primeiro acionamento de válvulas de controle no caso otimizado foi no quinto ano, pode-se concluir que a estratégia otimizada foi proativa à chegada de água nos poços produtores, mas o valor inicial para avaliação indicado pelos indicadores de campo foi próximo ao fechamento do caso otimizado. Por outro lado, o último acio-

namento sugerido pelo caso otimizado foi no décimo nono ano, mas considerando a estratégia inicial, observa-se que os indicadores de campo continuaram apontando viabilidade de avaliação para anos seguintes. Portanto, os indicadores de campo da estratégia inicial foram capazes de captar a viabilidade de aplicação de válvulas de controle nos anos iniciais, mas indicou potencialidade de avaliação por um tempo mais longo do que o necessário.

Os resultados da Figura 5-49 mostram o indicador I_2 para os poços produtores. Os resultados no gráfico estão limitados ao valor máximo de 1,5 para melhor visualização dos valores próximos aos critérios. Percebe-se que a maior parte dos poços apresenta o valor de I_2 abaixo do critério C2 para os poços por toda a vida produtiva dos poços. Isto indica que todos os anos, o FCL dos poços é reduzido de tal forma que sugere uma avaliação do uso de válvulas. Portanto, neste caso, não foi possível definir regiões mais específicas para avaliação somente com base no indicador I_2 .

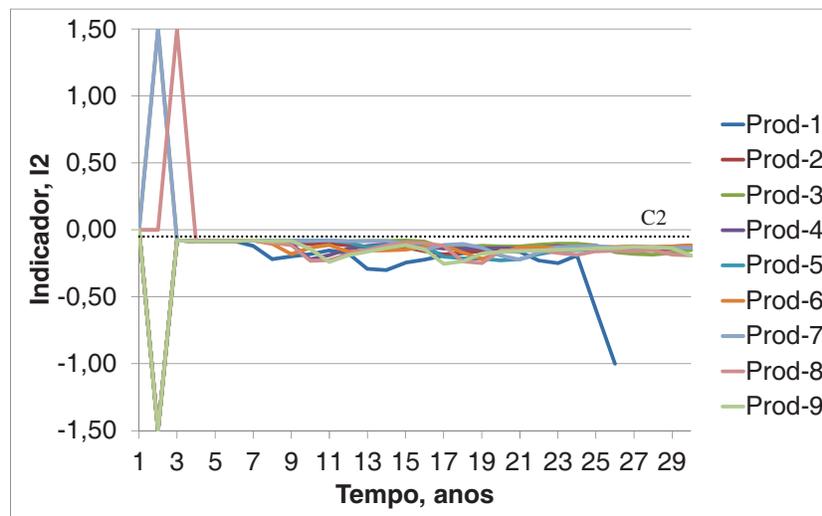


Figura 5-49: Indicador I_2 da estratégia inicial para os poços produtores no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Por outro lado, a Figura 5-50 mostra que o indicador I_3 apresenta valores que dividem de forma mais restritiva o tempo em que existe a viabilidade de avaliação. Para todos os poços, percebe-se que existe um aumento significativo no valor do indicador, seguido de uma redução. Entretanto, apesar das curvas apresentarem comportamentos iguais, nota-se que o ponto em que existe o pico das curvas é diferente para cada poço. Além disso, o valor do indicador cruza o va-

lor do critério em diferentes pontos. Portanto, o indicador I_2 mostrou diferentes comportamentos para os poços produtores.

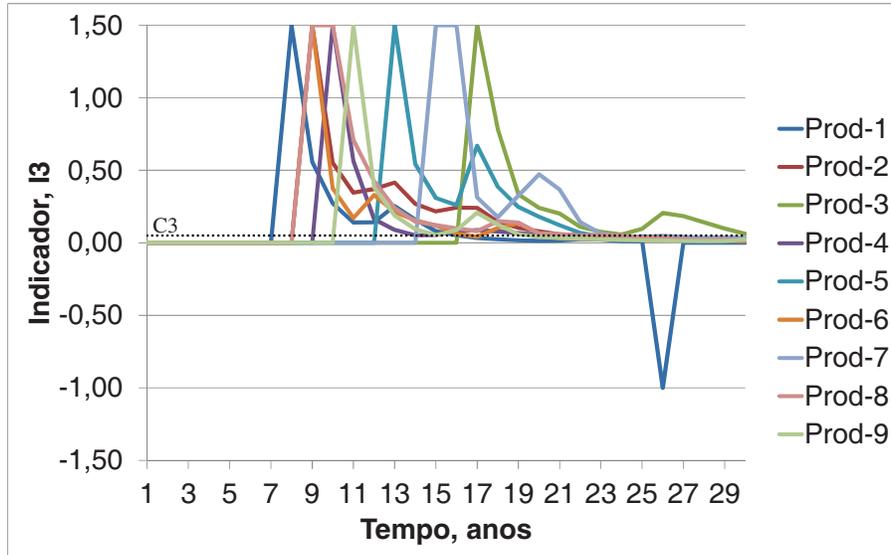


Figura 5-50: Indicador I_3 da estratégia inicial para os poços produtores no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

A Figura 5-51 mostra a combinação dos indicadores I_2 e I_3 para os poços Prod-1 e Prod-8 com o objetivo de ilustrar as diferenças entre os tempos que os poços apresentam viabilidade para avaliação. As linhas verticais na cor verde delimitam a região de viabilidade de avaliação do Prod-1 e as linhas verticais na cor laranja delimitam o Prod-8. Observa-se uma diferença entre os dois poços no tempo inicial e final de avaliação, bem como no número de tempos em que se aponta viabilidade de avaliação.

O Prod-1 na estratégia otimizada foi o primeiro poço a ser avaliado pelo método MOD-P e também foi o que apresentou o acionamento de válvulas mais cedo. Portanto, esperava-se que os indicadores de viabilidade para este poço apontassem a viabilidade de avaliação mais cedo do que os demais. Já o Prod-8 não apresentou viabilidade para este caso, mas foi testado ao longo da otimização. Portanto, a combinação dos indicadores no nível de avaliação do poço, mostrou-se eficiente em apontar o Prod-1 como o primeiro a ser avaliado, porém aponta também poços que não apresentaram viabilidade neste caso.

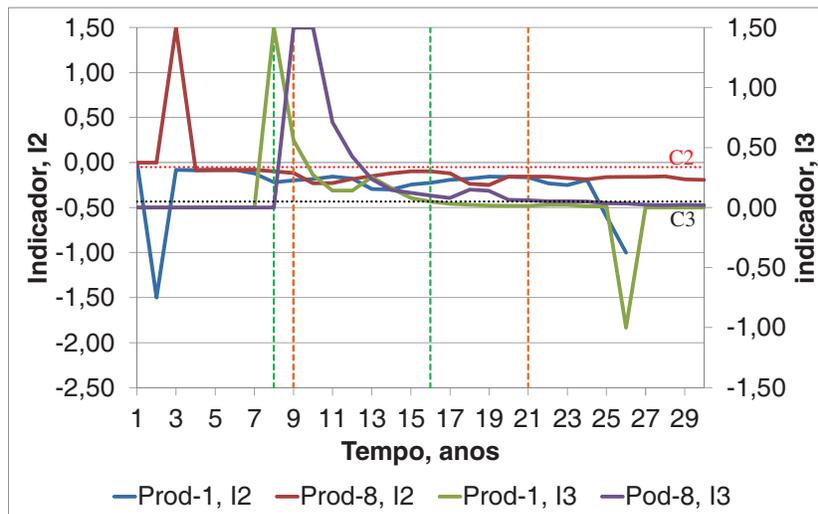


Figura 5-51: Evolução do indicador I_2 e I_3 para os poços Prod-1 e Prod-8 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Para exemplificar a evolução dos indicadores para as regiões do poço, são mostrados os indicadores para as regiões $RMP^{1,1}$, $RMP^{9,1}$, $RMP^{15,1}$ e $RMP^{22,1}$, que estão localizadas nas 4 diferentes camadas do reservatório. Com isso, pretende-se mostrar de forma geral, qual o comportamento econômico e produtivo das regiões ao longo de um poço para o caso M-2a.

Na Figura 5-52 observa-se uma diferença significativa entre o indicador I_2 de cada região. Analisando a partir do oitavo ano, quando os indicadores de poço e campo admitem uma avaliação do uso de válvulas, nota-se que a região $RMP^{9,1}$ e $RMP^{15,1}$ são as regiões que apresentam uma viabilidade de avaliação por um período maior de tempo. Além disso, a região $RMP^{9,1}$ apresenta viabilidade de avaliação mais cedo do que a $RMP^{15,1}$. Este resultado está em conformidade com o resultado da estratégia otimizada, na qual as regiões que apresentaram mais válvulas e mais cedo foram as regiões localizadas na camada do reservatório que se encontra a região $RMP^{9,1}$.

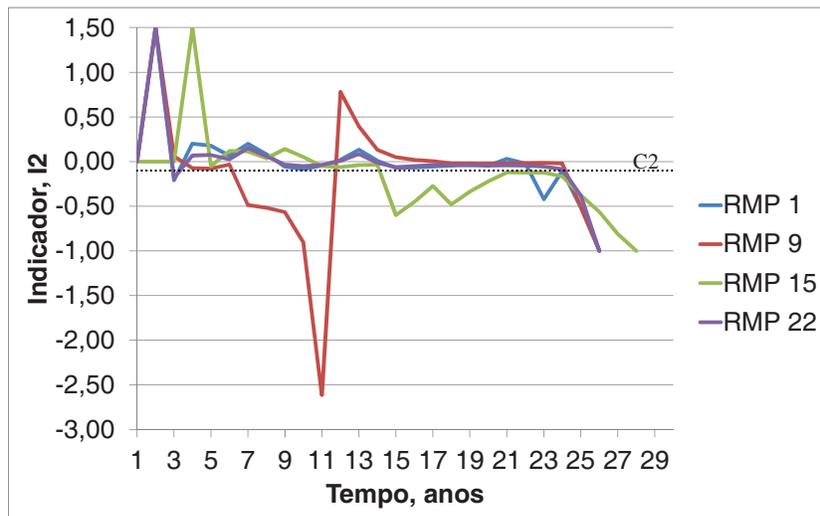


Figura 5-52: Evolução do indicador I_2 para regiões do poço Prod-1 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Na Figura 5-53 nota-se que o indicador I_3 também apresenta um comportamento diferente para as diferentes regiões do Prod-1. Observa-se que as variações do corte de água ocorreram de forma brusca e em diferentes momentos da produção. A região $RMP^{22,1}$ não apresentou variação no indicador. Portanto, a região $RMP^{22,1}$ não seria avaliada na otimização.

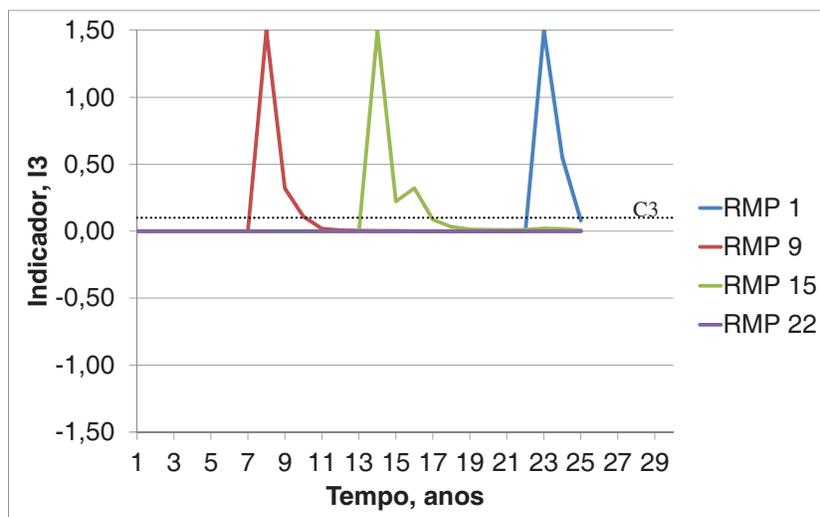


Figura 5-53: Evolução do indicador I_3 para regiões do poço Prod-1 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Considerando as regiões do poço Prod-1 que apresentam maior potencial de avaliação, a Figura 5-54 mostra a evolução dos indicadores I_2 e I_3 . As linhas tracejadas verticais na cor verde delimitam o período em que o conjunto de indicadores I_2 e I_3 apontam viabilidade de avaliação do uso de válvulas na região $RMP^{9,1}$. Já a delimitação pelas linhas verticais tracejadas na cor laranja apontam os períodos em que foi identificada viabilidade de avaliação para a região $RMP^{15,1}$.

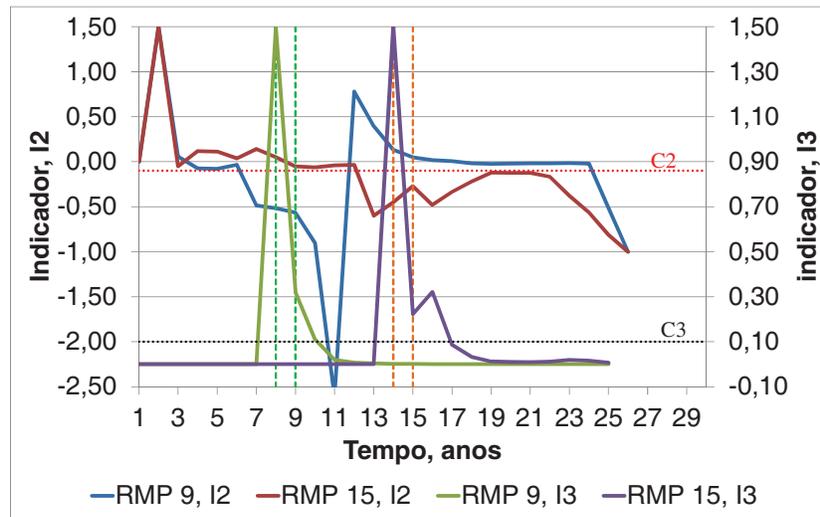


Figura 5-54: Evolução do indicador I_2 e I_3 para as regiões $RMP^{9,1}$ e $RMP^{15,1}$ do Prod-1 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Observa-se que as regiões de avaliação de cada região são restritas a dois anos, sendo que a avaliação da região $RMP^{9,1}$ ocorre em um período anterior. Portanto, houve uma restrição relevante do período em que se sugere a avaliação de uma válvula nas regiões consideradas. Além disso, a região $RMP^{9,1}$ foi a que, no caso otimizado, apresentou a viabilidade do uso de válvulas com acionamento da válvula mais cedo. Pode-se concluir que os indicadores foram capazes de restringir de forma significativa a região de avaliação de válvulas de controle e apontar de forma coerente a válvula a ser inicialmente testada.

A Figura 5-55 mostra a evolução do indicador I_4 para todos os poços da estratégia inicial. Observa-se que as curvas para os poços apresentam o mesmo comportamento de aumento do indicador após se deslocar do valor de zero. Isto significa que o desequilíbrio na distribuição do corte de água ao longo dos poços produtores pode ter comportamento similar, mas ocorrendo em

tempos diferentes. Considerando o critério C_4 , observa-se que todos os poços produtores apresentam o indicador I_4 favorável à avaliação do uso de válvulas de controle durante um determinado tempo de produção. Portanto, a avaliação do indicador restringe a avaliação dos poços por um tempo significativo da vida útil do campo. Entretanto, observa-se que a restrição avaliada pelo indicador I_3 é subconjunto da restrição do indicador I_4 . Portanto, neste caso o indicador I_4 apenas corrobora com a restrição do indicador I_3 .

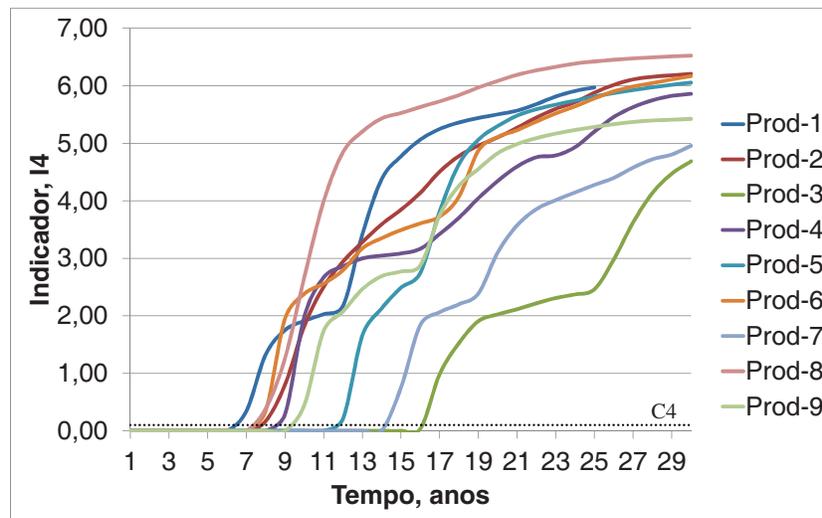


Figura 5-55: Evolução do indicador I_4 para os poços produtores da estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Os resultados para os indicadores classificatórios para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$, $RMP^{8,1}$ e $RMP^{9,1}$ do Prod-1 estão apresentados na Figura 5-56 à Figura 5-58. Essas regiões foram escolhidas por fazerem parte do grupo inicial que foi avaliado na execução da otimização do caso M-2a. Considerando o primeiro ano de análise do uso de válvulas de controle, o ano 10, observa-se que o método selecionaria a região $RMP^{9,1}$ com base no indicador I_2 , a região $RMP^{7,1}$ com base no indicador I_6 e não selecionaria nenhuma região pelo indicador I_7 . Portanto, a função dos estágios de avaliar diferentes regiões do reservatório seria realizada com sucesso se as curvas se mantivessem nos 3 estágios avaliados no método MOD-P.

Para os 3 indicadores, percebe-se que a evolução dos indicadores para cada região é significativamente diferente. Este resultado mostra que mesmo para regiões próximas foi possível diferenciar as regiões com os indicadores para selecionar apenas uma região. A exceção é o período

que não existe FCL negativo para nenhuma região, o que gera um indicador I_7 nulo. Entretanto, observa-se uma diferenciação das regiões $RMP^{8,1}$ e $RMP^{9,1}$ a partir do décimo primeiro ano para este indicador I_7 . Portanto, os indicadores classificatórios geraram diferenciação nas possíveis escolhas de regiões para avaliação para os diferentes anos de produção.

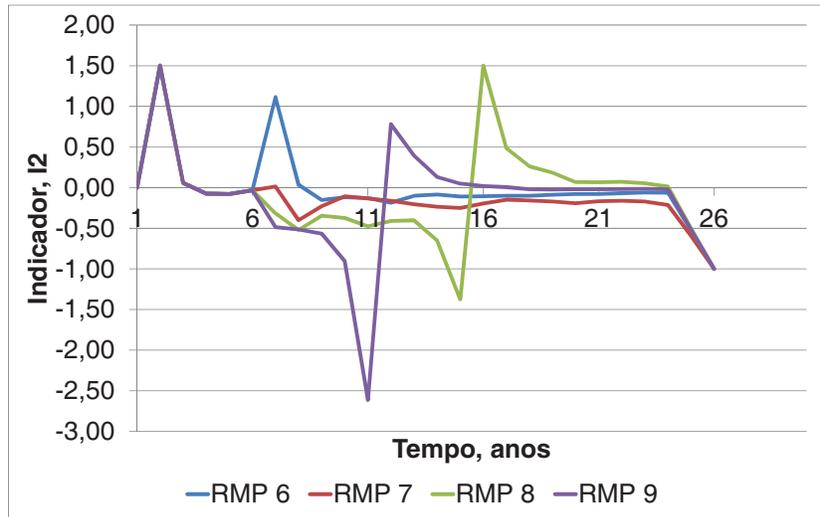


Figura 5-56: Evolução do indicador I_2 para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$, $RMP^{8,1}$ e $RMP^{9,1}$ da estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

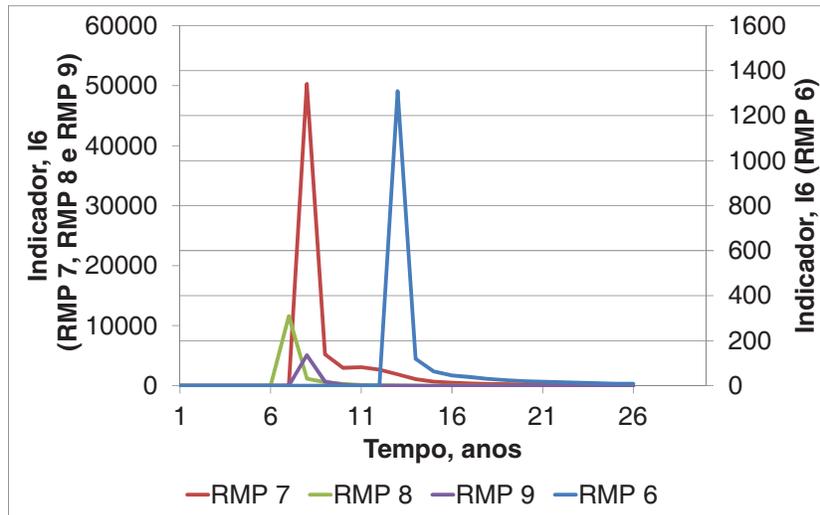


Figura 5-57: Evolução do indicador I_6 para as regiões $RMP^{6,1}$, $RMP^{7,1}$, $RMP^{8,1}$ e $RMP^{9,1}$ do Prod-1 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

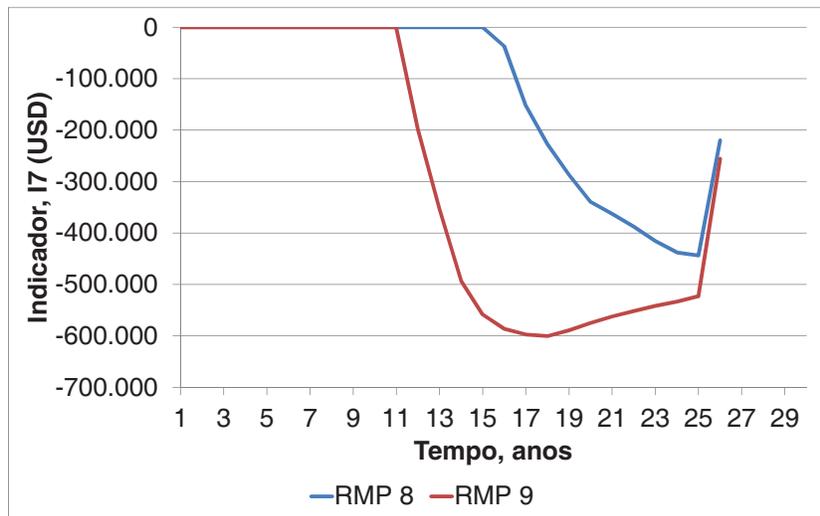


Figura 5-58: Evolução do indicador I_7 para as regiões $RMP^{8,1}$ e $RMP^{9,1}$ do Prod-1 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Considerando a região que primeiro mostrou potencial para aplicação de válvulas, a região $RMP^{9,1}$, e o ano em que a região foi selecionada, o ano 10, a Figura 5-59 mostra o indicador e evolução do indicador I_5 , sendo a região $RMP^{8,1}$ como a região que se deseja. O indicador mostra que para o ano avaliado, o indicador sugere que a região $RMP^{8,1}$ não seja agregada à região $RMP^{9,1}$.

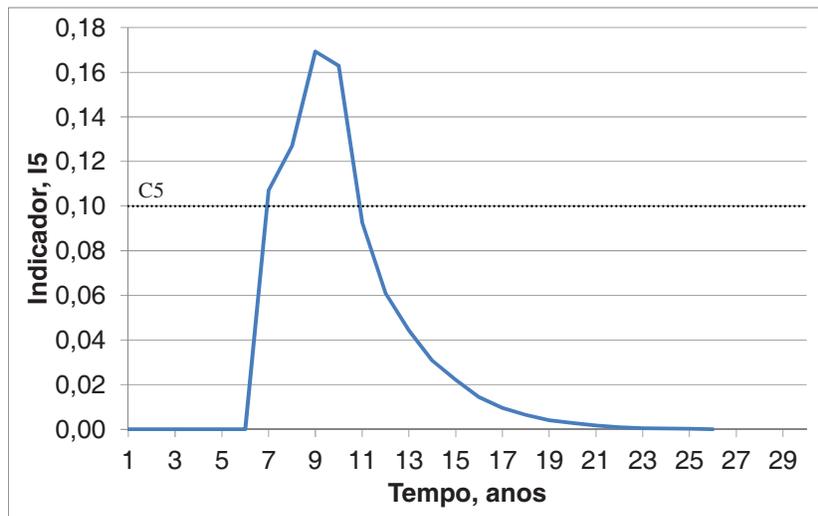


Figura 5-59: Diferença entre o corte de água das regiões $RMP^{8,1}$ e $RMP^{9,1}$ do Prod-1 na estratégia inicial do caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Entretanto, a estratégia otimizada mostra que as regiões deveriam ser agregadas para formar uma região maior de controle de uma única válvula. Portanto, o indicador não foi eficiente em avaliar as regiões subsequentes para agregá-las e evitar novos ciclos do método MOD-P. É importante observar que a diferença do corte entre as regiões permaneceu abaixo do critério durante a maior parte da vida produtiva do campo. Isto significa que na maior parte do tempo, esta avaliação teria sido realizada de forma mais eficiente através deste indicador.

Um resumo geral desta seção mostra que:

- os indicadores eliminatórios mostraram-se eficientes para avaliações realizadas durante a vida produtiva do campo e atingiram o objetivo de restringir as regiões avaliadas;
- os indicadores eliminatórios mostraram-se mais restritivos quando são analisados em escala menor, ou seja, os indicadores de região foram mais restritivos que os indicadores de campo;
- de forma geral, os indicadores I2 para campo, poço e região foram menos eficientes para restringir as regiões de avaliação do que o indicador I3;

- comparando os resultados que cada indicador classificatório aponta, observou-se que diferentes regiões podem ser avaliadas nos diferentes estágios do método MOD-P;
- o indicador de projeto I5 não foi eficiente em agregar as regiões $RMP^{8,1}$ e $RMP^{9,1}$ na primeira avaliação do método MOD-P. Porém os resultados mostraram que esta avaliação poderia ser diferente em outros períodos.

5.2.4.2 Avaliação dos indicadores após a inclusão da última válvula de controle

Nesta seção serão apresentados os resultados do caso M-2a após a otimização (Otimizado). O objetivo desta análise é exemplificar a mudança nos indicadores em relação aos obtidos na estratégia inicial (EI). São utilizados exemplos de alguns poços e regiões de poço para apresentar como essas alterações ocorreram. Com isso, espera-se mostrar que no decorrer da otimização a avaliação dos indicadores seja alterada e que ao final do processo a potencialidade de avaliação seja reduzida.

A Figura 5-60 mostra os indicadores I2 e I3 para o campo para a estratégia inicial (EI) e a estratégia otimizada (Otimizado). Observa-se que as curvas do indicador I₂ estão sobrepostas, o que indica que este indicador foi pouco alterado. Já a curva para o indicador I₃ do caso otimizado permanece acima da curva da estratégia inicial. Isto é explicado devido ao fato da produção de água iniciar com valores maiores no ano 7 na estratégia inicial. Enquanto a produção de água no sétimo ano foi de 12,5 mil m³, para a estratégia otimizada foi de 2,0 mil m³. Por este motivo indicador I₃ para o oitavo ano foi maior para a estratégia otimizada, mesmo tendo uma produção de água menor do que na estratégia inicial. Pode-se concluir que, no nível do campo, o impacto das alterações na estratégia inicial não afetou de forma relevante os indicadores relativos ao FCL e ao corte de água.

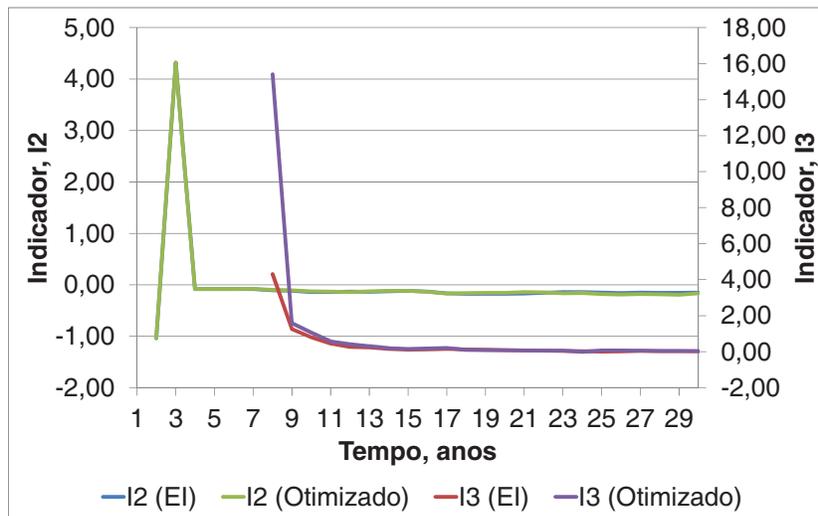


Figura 5-60: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para o campo no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Os resultados da Figura 5-61 mostram as curvas dos indicadores I_2 e I_3 para o poço Prod-1, considerando a estratégia inicial (EI) e a estratégia otimizada (Otimizado), com uma válvula de controle. Percebe-se que os indicadores para o Prod-1 são mais alterados dos que os indicadores mostrados para o campo. Nota-se que nos primeiros anos a estratégia otimizada foi capaz de reduzir a queda do indicador I_2 . Entretanto, a partir do décimo primeiro ano, o indicador de ambas as estratégias variaram entre a maior e menor redução anual. Já para o indicador I_3 , ocorreu a mesma situação mostrada na Figura 5-60, onde a estratégia otimizada teve um maior aumento do indicador I_3 nos anos 8 a 13. O motivo também foi a menor produção de água no ano 7, tendo um maior aumento do indicador nos anos seguintes. Portanto, uma análise para o poço que obteve válvulas de controle na estratégia otimizada mostra que os indicadores I_2 e I_3 foram pouco impactados pelo uso de válvulas, apesar de apresentar uma leve alteração.

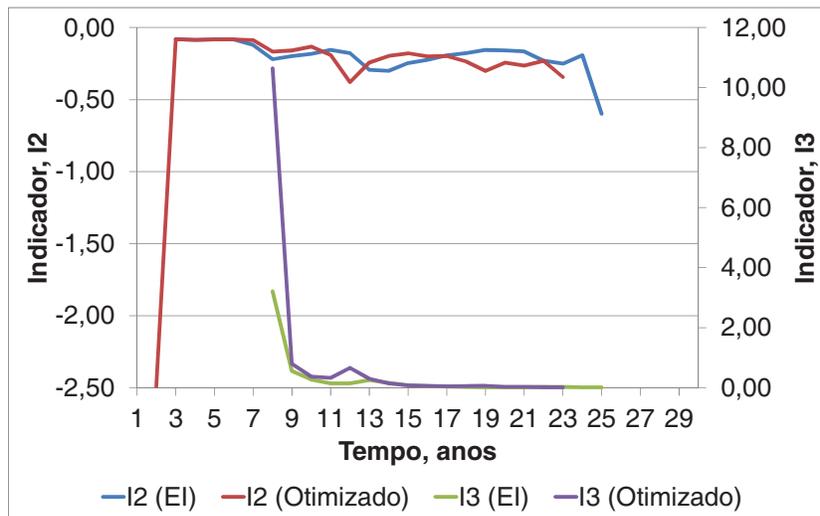


Figura 5-61: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para o poço Prod-1 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

A Figura 5-62 mostra os resultados dos indicadores I_2 e I_3 para o poço Prod-8, o qual não possui válvulas de controle na estratégia otimizada. Ambas as curvas para cada indicador I_2 e I_3 estão sobrepostas ou próximas. Portanto, os indicadores I_2 e I_3 no nível de poço, para poços que não receberam válvulas, foram pouco impactados pelas válvulas de controle em outros poços.

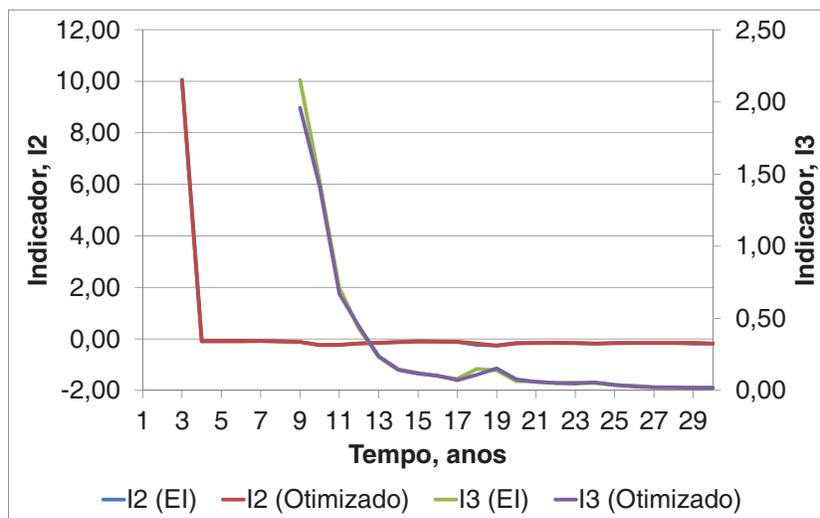


Figura 5-62: Evolução dos indicadores I_2 e I_3 para o poço Prod-8 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Considerando os indicadores de regiões do poço do Prod-1, a Figura 5-63 mostra as curvas do indicador I_2 para a estratégia inicial (EI) e a estratégia otimizada (Otimizado). Observa-se que os indicadores, no nível de região de poços, são alterados de forma mais significativa. A região $RMP^{15,1}$ está localizada em uma camada do reservatório não conectada com a camada que possui uma válvula de controle na estratégia otimizada. Entretanto, percebe-se uma alteração do indicador. O indicador para a região $RMP^{9,1}$ é alterado devido à inclusão de válvula de controle nesta região e a partir do quarto ano o indicador não apresenta valor. Portanto, em um poço com válvulas de controle, mesmo regiões não conectadas à região controlada sofrem influência no FCL.

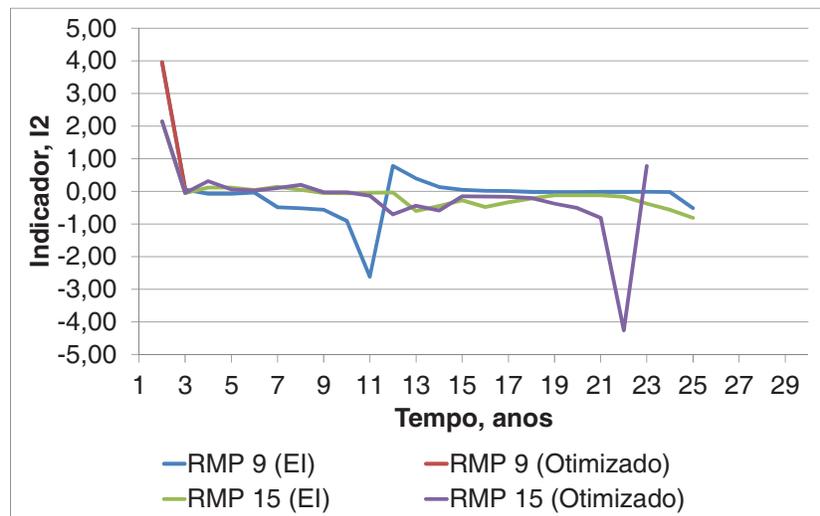


Figura 5-63: Evolução do indicador I_2 para as regiões $RMP^{9,1}$ e $RMP^{15,1}$ do poço Prod-1 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

A Figura 5-64 mostra as curvas do indicador I_3 para a região $RMP^{9,1}$ e $RMP^{15,1}$ do Prod-1. Analisando as curvas para a região $RMP^{15,1}$, observa-se que o indicador apresenta um valor mais elevado e mais cedo na estratégia otimizada. Este resultado mostra que o corte de água foi significativamente alterado para a região devido à introdução de válvulas de controle na estratégia. Percebe-se também que, devido ao acionamento da válvula na região $RMP^{9,1}$ antes da chegada da água, o indicador para esta região é nulo. Portanto, o indicador da variação do corte de água mostrou-se sensível às alterações, no nível de região, na estratégia de produção.

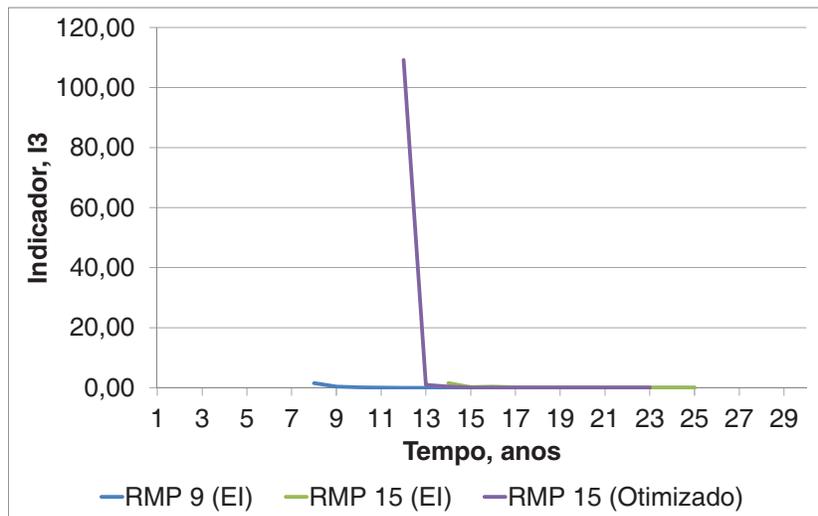


Figura 5-64: Evolução do indicador I_3 para as regiões $RMP^{9,1}$ e $RMP^{15,1}$ do poço Prod-1 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Na Figura 5-65, observa-se a evolução do indicador I_4 para alguns poços na estratégia inicial (EI) e na estratégia otimizada (Otimizado). O Prod-1 recebeu válvulas de controle na estratégia otimizada, enquanto o Prod-2 e o Prod-8 não mostram viabilidade para aplicação de válvulas. Diferentes comportamentos são observados nos 3 poços.

Observa-se que as curvas relativas ao Prod-1 foram significativamente alteradas, sendo que na estratégia otimizada o valor do indicador começou a aumentar um ano depois da estratégia inicial. Apesar desse comportamento no início observa-se que as curvas invertem de posição em alguns períodos, sendo que a curva da estratégia otimizada apresenta valor abaixo da outra curva. Portanto, a distribuição do corte de água pode ser mais elevada na estratégia otimizada em alguns pontos da curva, apesar de que para os anos seguintes após o acionamento da válvula, observa-se uma menor dispersão dos valores na estratégia otimizada.

Para os poços sem válvulas, observam-se dois comportamentos diferentes para o Prod-2 e o Prod-8. A curva relativa ao Prod-2 não foi alterada de forma significativa. Já o Prod-8 sofreu impacto do acionamento das válvulas e a distribuição do corte de água foi mais equilibrada na estratégia otimizada. Este resultado mostra que os indicadores de poços podem ter reações diferentes para a inclusão de válvulas de controle

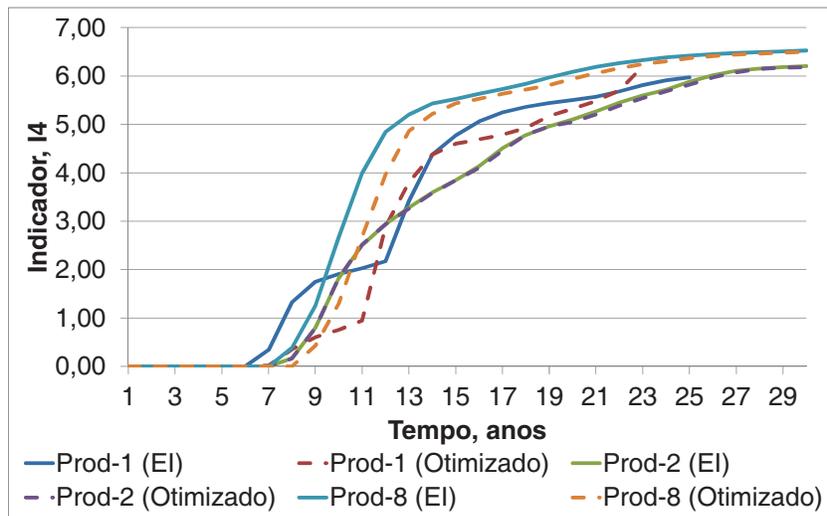


Figura 5-65: Evolução do indicador I_4 para o poço Prod-1, Prod-2 e Prod-8 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Para avaliar o Indicador I_2 como um indicador classificatório, mostra-se na Figura 5-66 o comportamento do indicador em duas regiões de controle do poço Prod-1, localizadas em uma mesma camada do reservatório. Uma das regiões, $RMP^{9,1}$, foi contemplada com uma válvula de controle na estratégia otimizada, enquanto que a região $RMP^{6,1}$ não mostrou viabilidade de aplicação. Observa-se que o acionamento da válvula para controle da região $RMP^{9,1}$ afetou de forma significativa o indicador da região $RMP^{6,1}$, provocando um aumento no seu valor nos anos seguintes ao acionamento da válvula. Este indicador mostra que o FCL da região que permaneceu aberta foi significativamente aumentado nos anos próximos ao fechamento da válvula de controle. Portanto, o método MOD-P apresentaria respostas diferentes na classificação da região $RMP^{6,1}$ considerando o caso otimizado.

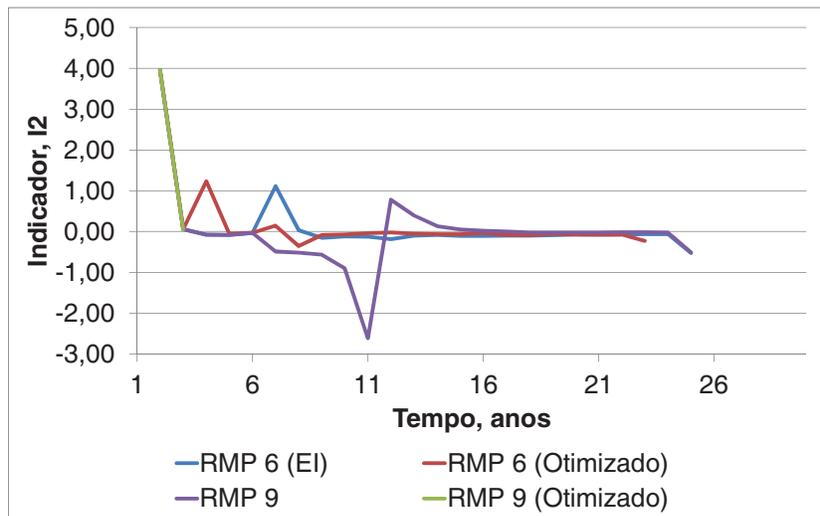


Figura 5-66: Evolução do indicador I_2 para regiões do poço Prod-1 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

A Figura 5-67 mostra o indicador classificatório I_6 para as regiões $RMP^{9,1}$ e $RMP^{6,1}$ para a estratégia inicial (EI) e a estratégia otimizada (Otimizado). O gráfico está limitado no seu eixo vertical principal por um valor de 5000 para que as diferenças entre o indicador da região $RMP^{6,1}$ nas duas estratégias fossem mais bem visualizadas. No eixo vertical secundário, encontra-se os valores do indicador para a região $RMP^{9,1}$.

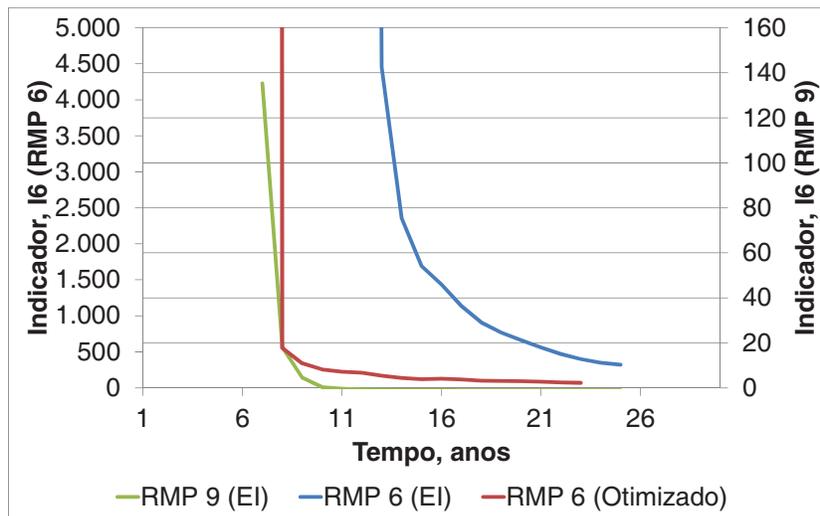


Figura 5-67: Evolução do indicador I_6 para regiões do poço Prod-1 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Observa-se que, a partir do sétimo ano a curva do indicador I_6 para a região $RMP^{6,1}$ foi alterada de forma relevante. O indicador teve ser valor reduzido durante todo o período de produção posterior. Este resultado indica que a região $RMP^{6,1}$ teria maior probabilidade de ser selecionada para testes do que na estratégia inicial. Entretanto, os valores do indicador I_6 ainda apresentam valores significativamente maiores do que os valores apresentados para a região $RMP^{9,1}$ antes das avaliações para uso de válvulas de controle. Isto significa que a relação entre o FCL e o custo da produção de água para a região, diminui de forma relevante devido o acionamento de válvulas de controle em outras regiões. Portanto, nota-se uma mudança significativa no indicador classificatório I_6 para regiões próximas as regiões com aplicação de válvulas de controle.

A Figura 5-68 mostra a diferença entre as curvas do indicador I_7 para a estratégia inicial e a estratégia otimizada para algumas regiões do Prod-1. Observa-se que este indicador comporta-se de forma diferente na estratégia inicial e na estratégia otimizada. Uma diferença negativa indica que a região na estratégia otimizada teve um FCL negativo ou mais negativo do que na estratégia inicial. Portanto, a classificação das regiões pode ser alterada conforme válvulas de controle são inseridas na estratégia de produção.

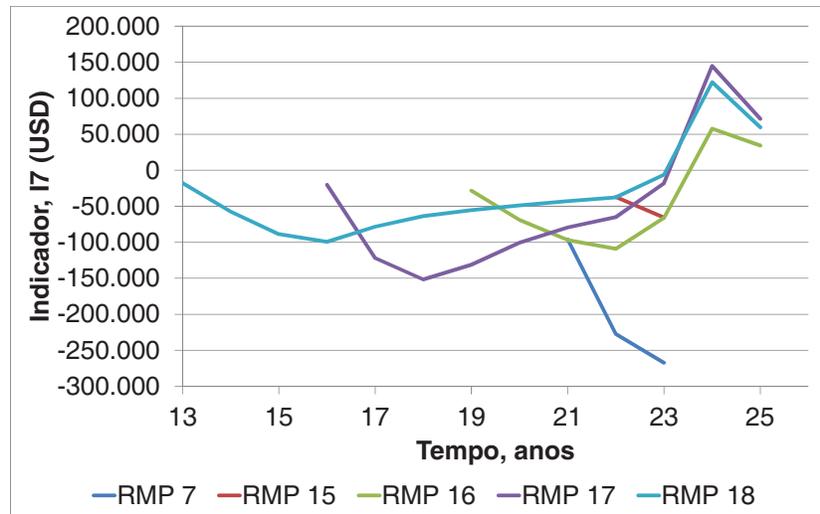


Figura 5-68: Diferença entre o indicador I_7 da estratégia otimizada e a estratégia inicial para regiões do poço Prod-1 no caso M-2a utilizando o modelo econômico ME-2a.

Observa-se que a região $RMP^{7,1}$ tem o FCL negativo antecipado na estratégia otimizada. Esta região é a região mais próxima à região controlada por uma válvula de controle no Prod-1. O

mesmo comportamento foi observado nas regiões $RMP^{15,1}$, $RMP^{16,1}$, $RMP^{18,1}$ e $RMP^{7,1}$. Portanto, o limite econômico de produção foi atingido mais rapidamente nas regiões não controladas por válvulas. Entretanto, o FCL negativo na parte final da vida produtiva do campo é maior na estratégia inicial.

Como resumo da análise da diferença entre os indicadores da estratégia otimizada e da estratégia inicial, pode-se destacar os seguintes pontos:

- a aplicação de válvulas na estratégia de produção alterou de forma mais significativa os indicadores de região, do que os indicadores de poços e campo;
- os indicadores de poços foram alterados de forma diferente. Poços com válvulas apresentaram alterações mais relevantes, mas o Prod-8 também apresentou uma variação significativa nos indicadores;
- os indicadores podem ter sua ordem de avaliação alterada com base nos indicadores classificatórios;
- regiões localizadas na mesma camada das regiões controladas por válvulas tiveram seus indicadores alterados mais significativamente. Em geral, nesses casos, observou-se um maior FCL imediatamente após os acionamentos de válvulas, acompanhada de uma chegada de água mais forte e/ou antecipada em períodos mais próximos ao fim da vida útil do poço;
- pode-se concluir que o método MOD-P pode ter suas avaliações alteradas devido à inclusão de válvulas de controle em poços.

5.2.5 Otimização do exemplo E-2 para diferentes cenários econômicos

Nesta seção, estão apresentados os resultados de indicadores econômicos das estratégias otimizadas no exemplo E-2. As análises dos resultados têm os objetivos de mostrar de forma simplificada os resultados da otimização e o impacto do uso de válvulas de controle na economia do campo e sua relação com diferentes modelos de reservatórios e cenários. Com isso, pretende-se concluir sobre a forma com que os benefícios introduzidos pelo uso de válvulas de controle são revelados nos indicadores de longo prazo do campo.

5.2.5.1 Resultados gerais do processo de otimização do exemplo E-2

A Tabela 5-17 apresenta dados gerais sobre a otimização das combinações propostas de modelos de reservatório e cenários econômicos. A primeira coluna identifica o modelo de reservatório utilizado, enquanto que a segunda e a terceira mostram as diferenças dos modelos econômicos. As demais colunas mostram indicadores econômicos da estratégia otimizada.

Observa-se que os casos M-2a e M-2b apresentaram viabilidade do uso de válvulas em todos os modelos econômicos, enquanto que os casos M-2c e M-2d apresentaram viabilidade para apenas um conjunto de modelo de reservatório e modelo econômico. Considerando que os casos M-2a e M-2b têm uma restrição significativa da vazão de líquidos da plataforma e que os casos M-2c e M-2d não apresentam restrição na produção, pode-se concluir que estratégias com restrição de produção na plataforma apresentam maior viabilidade para o uso de válvulas de controle. Observa-se ainda que uma estratégia para o caso M-2c apresentou viabilidade de instalação de uma válvula de controle. Portanto, para este exemplo, a restrição da plataforma foi um fator relevante na estratégia de produção para viabilizar o uso de válvulas de controle.

Os resultados mostram que, avaliando os casos de forma separada, a produção total de óleo do campo (PTOC) foi equivalente para todos os cenários econômicos. Por outro lado, a produção total de água do campo (PTAC) variou de forma mais significativa entre os diferentes cenários. Portanto, o cenário econômico influenciou de forma mais relevante a produção de água, ou seja, do fluido indesejado.

Destacando os resultados do caso M-2a e M-2b, observa-se uma variação no número otimizado de válvulas de controle e do investimento requerido. O modelo econômico M-2a (em vermelho) é o modelo intermediário em relação ao preço de óleo e ao custo da água, apresentando também valores intermediários para estes dois indicadores. Percebe-se também que cenários com maior preço do óleo não produziram estratégias com maior número e investimento em válvulas, mas foi o cenário com maior custo da água produzida que gerou estratégias com maior viabilidade de investimentos. Portanto, os investimentos em válvulas de controle foram mais sensíveis a uma variação no custo da água produzida do que ao preço do óleo.

Tabela 5-17: Dados gerais da otimização dos casos otimizados no exemplo E-2.

Caso	Preço do óleo (USD/stdm ³)	Custo da água (USD/stdm ³)	PTOC Milhões stdm ³	PTAC Milhões stdm ³	Número de válvulas	VPL Milhões USD	Inv. Milhões USD	Aumento VPL Milhões USD
M-2a	314,5	6,29	51,54	21,55	11	1.038,152	8,20	47,86
M-2a	188,7	6,29	51,18	20,61	9	-437,92	6,90	21,09
M-2a	251,6	6,29	51,19	22,48	8	316,70	6,60	29,16
M-2a	377,4	6,29	51,42	22,37	10	1.836,20	7,90	55,85
M-2a	440,3	6,29	51,51	22,68	8	2.556,03	7,30	70,28
M-2a	314,5	1,57	51,36	22,97	8	1.043,31	6,60	39,47
M-2a	314,5	3,15	51,16	23,09	12	1.080,62	5,30	36,73
M-2a	314,5	12,58	51,49	19,88	12	1.029,47	9,20	56,17
M-2a	314,5	25,16	51,28	18,05	13	1.003,80	9,80	67,67
M-2b	314,5	6,29	49,75	22,23	10	974,74	7,20	47,29
M-2b	188,7	6,29	49,54	19,91	10	-462,80	6,50	24,22
M-2b	251,6	6,29	49,19	22,46	6	270,40	4,60	28,26
M-2b	377,4	6,29	49,54	22,21	7	1.758,66	5,60	58,48
M-2b	440,3	6,29	49,49	22,80	9	2.450,54	6,20	61,77
M-2b	314,5	1,57	49,38	22,98	7	980,50	5,60	39,36
M-2b	314,5	3,15	49,17	22,59	6	973,59	4,60	37,04
M-2b	314,5	12,58	49,19	22,17	11	994,23	4,90	40,56
M-2b	314,5	25,16	49,57	19,24	14	939,37	8,40	66,65
M-2c	314,5	6,29	31,37	24,71	1	159,56	1,00	1,25
M-2c	188,7	6,29	31,33	24,82	0	-829,10	0,00	0,00
M-2c	251,6	6,29	31,33	24,83	0	-356,28	0,00	0,00
M-2c	377,4	6,29	31,31	24,84	0	716,99	0,00	0,00
M-2c	440,3	6,29	31,33	24,82	0	1.190,23	0,00	0,00
M-2c	314,5	1,57	31,31	24,84	0	172,46	0,00	0,00
M-2c	314,5	3,15	31,31	24,84	0	167,73	0,00	0,00
M-2c	314,5	12,58	31,31	24,84	0	139,45	0,00	0,00
M-2c	314,5	25,16	31,31	24,84	0	101,73	0,00	0,00
M-2d	314,5	6,29	33,14	26,18	0	253,17	0,00	0,00
M-2d	188,7	6,29	33,16	26,17	0	-787,60	0,00	0,00
M-2d	251,6	6,29	33,15	26,18	0	-245,31	0,00	0,00
M-2d	377,4	6,29	33,14	26,18	0	838,67	0,00	0,00
M-2d	440,3	6,29	33,16	26,17	0	1.338,44	0,00	0,00
M-2d	314,5	1,57	33,14	26,18	0	267,82	0,00	0,00
M-2d	314,5	3,15	33,14	26,18	0	262,92	0,00	0,00
M-2d	314,5	12,58	33,14	26,18	0	233,64	0,00	0,00
M-2d	314,5	25,16	33,14	26,18	0	194,59	0,00	0,00

Considerando ainda os casos M-2a e M-2b, observa-se que os ganhos gerados pelo uso de válvulas de controle foram pelo menos 3 vezes maiores que os investimentos necessários. O menor caso foi do modelo M-2a com modelo econômico ME-2b. Já para o único caso com válvulas de controle no caso M-2c, o ganho foi de aproximadamente 0,25. Portanto, os ganhos foram rele-

vantes quando comparados aos investimentos, exceto para o caso M-2c, que obteve um resultado inferior aos demais.

A Tabela 5-18 mostra o número total de simulações de reservatórios utilizadas na otimização de cada caso. Observa-se que os casos M-2a e M-2b, os quais mostraram maior viabilidade do uso de válvulas, apresentaram um número maior de simulações do que os casos M-2c e M-2d. Mesmo assim, o máximo número de simulações requerido foi de 269 simulações (em vermelho). Já o menor número de simulações requerido foi de 21 simulações (em azul). Estes resultados mostram que o método MOD-P utilizou um número relativamente baixo de simulações para a otimização do exemplo E-2.

Tabela 5-18: Número de simulações utilizadas para otimização dos casos do exemplo E-2.

Modelo Econômico	M-2a	M-2b	M-2c	M-2d
M-2a	191	218	49	43
M-2b	204	269	32	38
M-2c	165	126	30	38
M-2d	185	179	30	37
M-2e	181	199	29	40
M-2f	165	137	29	34
M-2g	133	119	29	21
M-2h	246	130	32	38
M-2i	244	248	34	38

5.2.5.2 Relações entre indicadores de campo e cenários econômicos

A Figura 5-69 e a Figura 5-70 mostram a relação entre o VPL das válvulas de controle e o preço do óleo e o custo da água produzida, respectivamente. Observa-se uma tendência linear de aumento do VPL, com o aumento do preço do óleo para os casos M-2a e M-2b. Este resultado indica que quanto maior o preço do óleo, maiores são os ganhos proporcionados pelas válvulas de controle. A mesma tendência é observada para o aumento no custo da água produzida. Já o caso M-2c apresenta o único aumento para valores intermediários de preço do óleo e custo da água. Conclui-se que, para estes casos, o aumento do preço do óleo ou aumento do custo da água produzida aumentam os ganhos com as válvulas de controle.

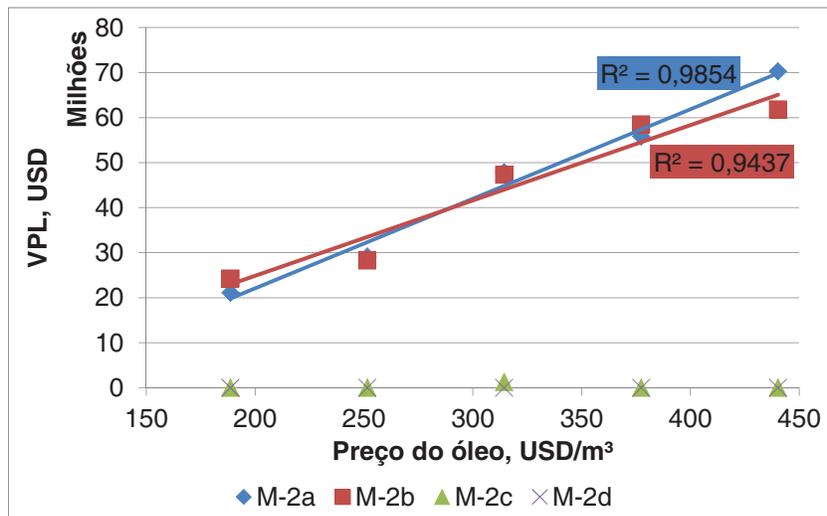


Figura 5-69: Relação entre o VPL das válvulas de controle e o preço do óleo.

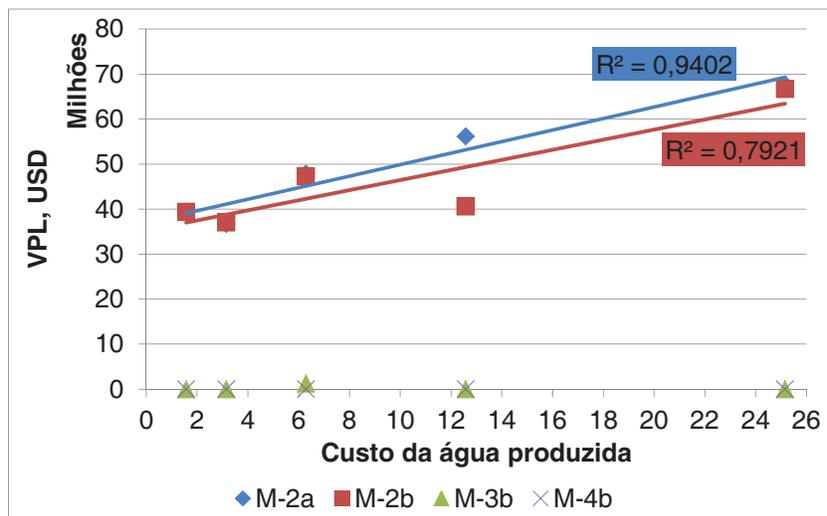


Figura 5-70: Relação entre o VPL das válvulas de controle e o custo da água produzida.

Entretanto, avaliando-se o ganho percentual entre o VPL da estratégia inicial e o VPL da estratégia otimizada com válvulas de controle, observa-se um comportamento diferente para a relação com o preço do óleo. Percebe-se na Figura 5-71 que existe um pico nos ganhos percentuais em relação à estratégia inicial. Portanto, preços elevados ou muito baixos tendem a diminuir a razão entre o VPL da estratégia otimizada e o VPL da estratégia inicial. Já a relação entre aumento percentual do VPL e o custo da água tem uma tendência linear de crescimento.

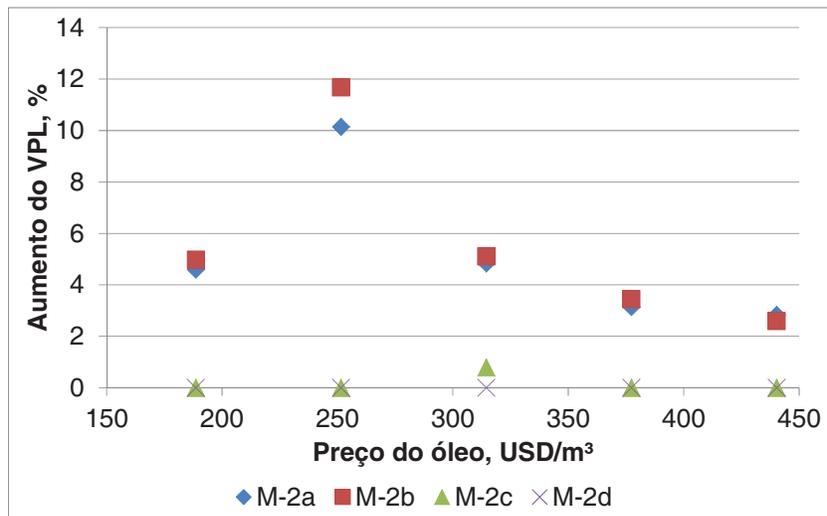


Figura 5-71: Relação entre o aumento porcentual no VPL da estratégia inicial e o preço do óleo.

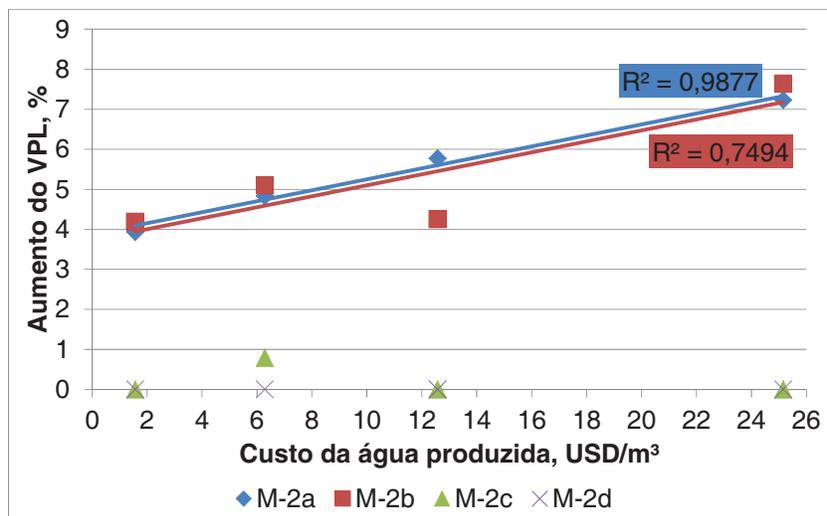


Figura 5-72: Relação entre o aumento porcentual no VPL da estratégia inicial e o custo da água produzida.

Os resultados da Figura 5-73 à Figura 5-76 mostram duas relações entre a produção de óleo e o preço do óleo e o custo da água produzida. A Figura 5-73 e a Figura 5-74 apresentam a produção total de óleo incrementada na estratégia inicial pelo uso de válvulas e sua relação com o preço do óleo e o custo da água produzida, respectivamente. A Figura 5-75 e a Figura 5-76 apresentam o aumento porcentual na produção total de óleo do campo entre a estratégia inicial e a otimizada.

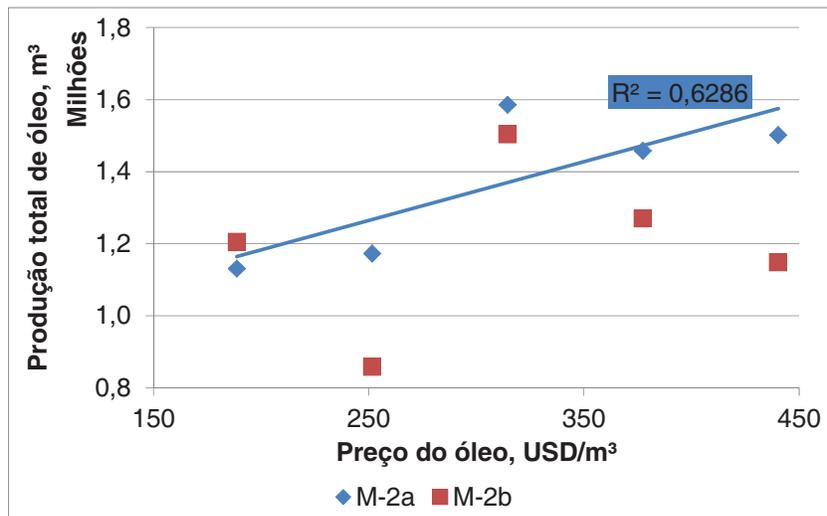


Figura 5-73: Relação entre o aumento na produção de óleo causado pela aplicação de válvulas de controle e o preço do óleo.

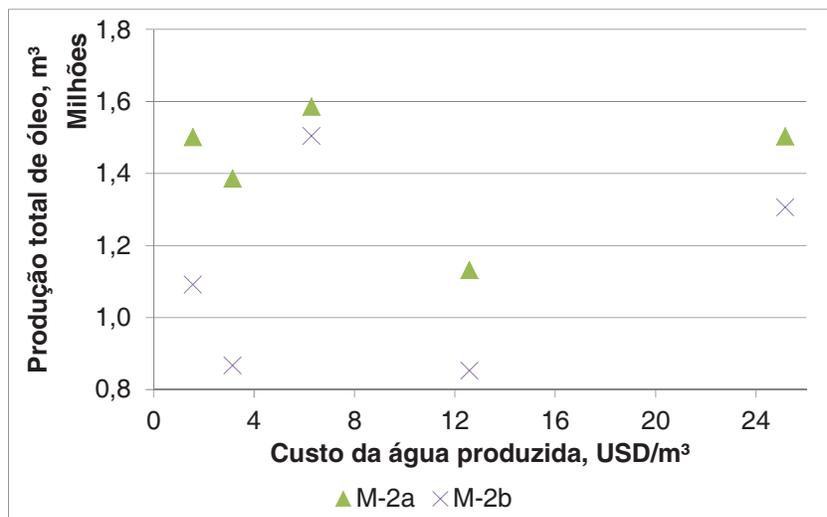


Figura 5-74: Relação entre o aumento na produção de óleo causado pela aplicação de válvulas de controle e o custo da água.

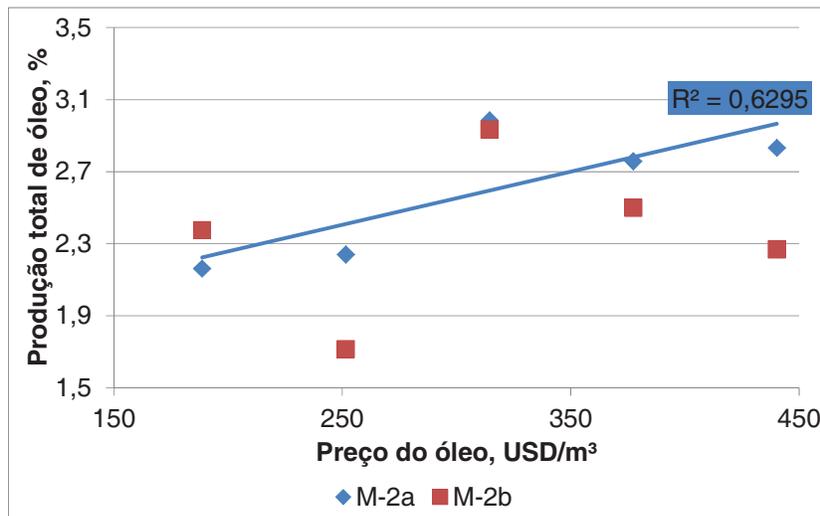


Figura 5-75: Aumento percentual na produção total de óleo em relação à estratégia inicial e o preço do óleo.

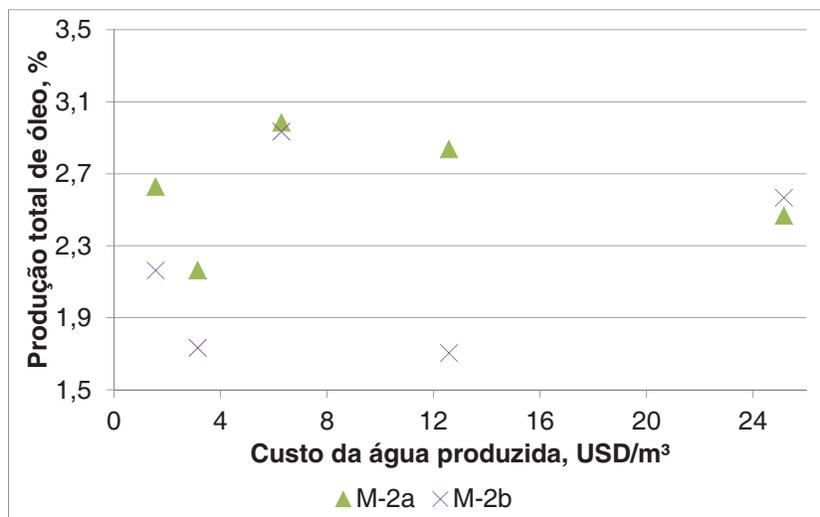


Figura 5-76: Aumento percentual na produção total de óleo em relação à estratégia inicial e o custo da água.

Apenas para o preço do óleo no caso M-2a observa-se uma tendência linear, ainda que fraca, de aumento da produção de óleo com o aumento do preço do óleo (Figura 5-73). Para os outros casos apresentados, não se observa uma relação lógica entre os indicadores de produção de óleo e os preços e custos. Portanto, nos casos analisados, não se pôde relacionar a produção de óleo proporcionada pelo uso de válvulas com os preços do óleo ou custos com água produzida.

Entretanto, a relação entre a produção de água reduzida pelo uso de válvulas apresenta melhor correlação linear com os preços do óleo e custos da água. Na Figura 5-77 e na Figura 5-78 são apresentadas a produção total de água reduzida da produção de água da estratégia inicial pelo uso de válvulas. Já nas Figura 5-79 e Figura 5-80 são apresentadas as reduções percentuais na produção total de água do campo entre a estratégia inicial e a otimizada.

A Figura 5-77 e a Figura 5-79 e apresentam tendência linear, mesmo que fraca, de redução na produção de água para cenários com menor preço do óleo, tanto para valores absolutos quanto para os valores percentuais. Por outro lado, percebe-se uma tendência linear mais forte de maiores reduções na produção de água com o aumento do custo da água produzida, sendo que essa tendência é mais forte para o indicador de redução percentual da água produzida (Figura 5-78 e Figura 5-80). Este resultado mostra que a relação dos benefícios do uso de válvulas de controle foi mais clara em relação à produção de água do que à produção de óleo.

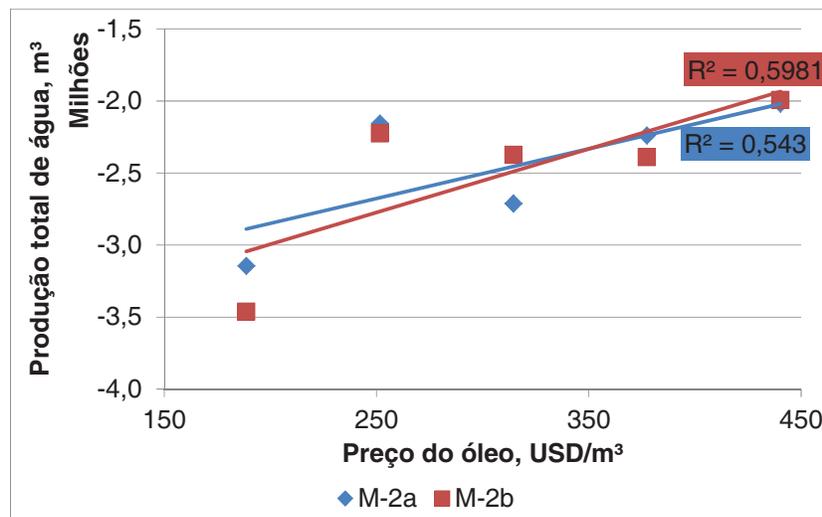


Figura 5-77: Relação entre a redução na produção de água causada pela aplicação de válvulas de controle e o preço do óleo.

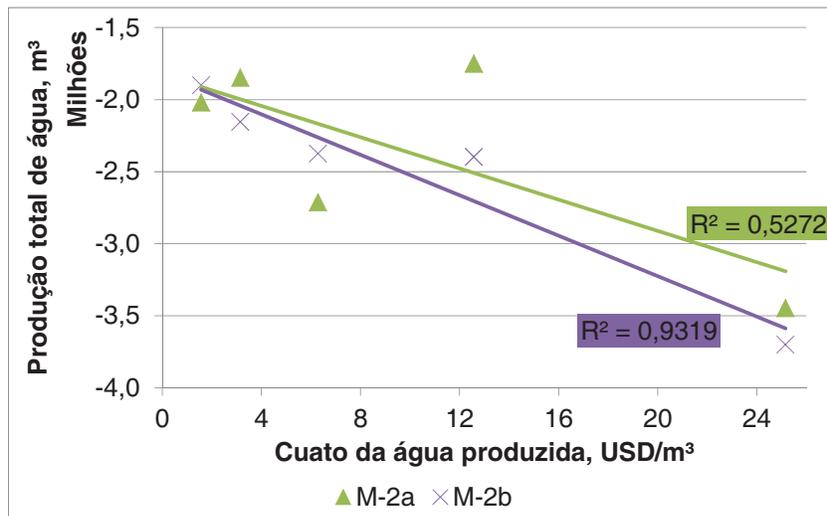


Figura 5-78: Relação entre a redução na produção de água causada pela aplicação de válvulas de controle e o custo da água.

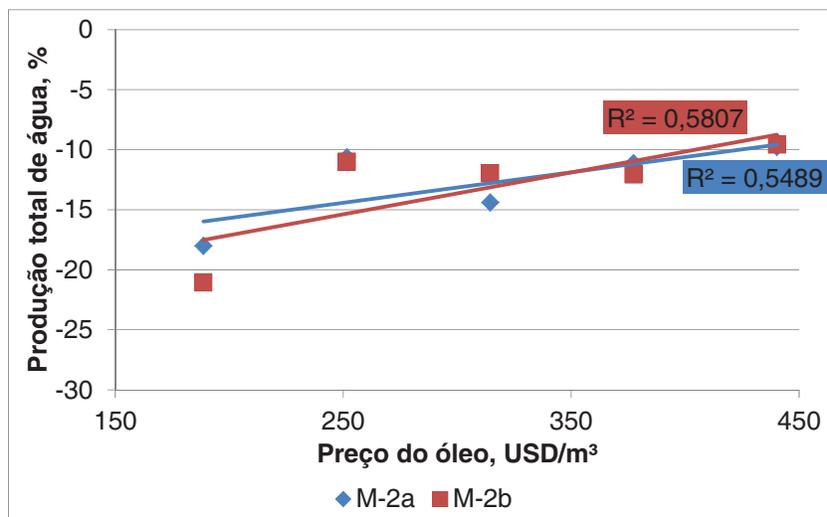


Figura 5-79: Relação entre a redução percentual na produção total de água em relação à estratégia inicial e o preço do óleo.

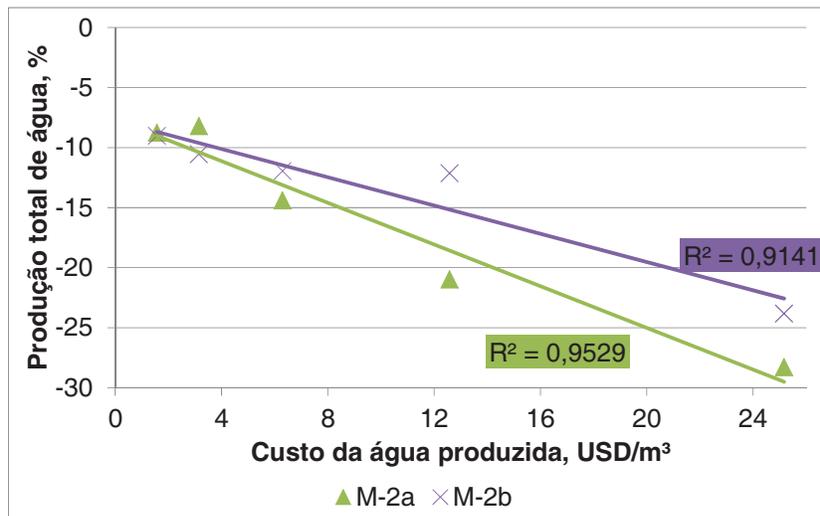


Figura 5-80: Relação entre a redução percentual na produção total de água em relação à estratégia inicial e o custo da água.

Observando a Figura 5-81 e a Figura 5-82, nota-se que existe uma tendência mais clara entre os investimentos necessários para aplicação de válvulas de controle e os custos com a água produzida do que com o preço do óleo. Os resultados mostram que não é possível descrever uma função linear para relacionar os investimentos com o preço do óleo, já que os pontos das séries variam de forma significativa entre o menor e o maior preço considerado (Figura 5-81). Entretanto, a relação com o custo da água é mais clara, apesar de os índices de correlação entre cada série e sua respectiva linha de tendência não serem elevados (Figura 5-82). Portanto, assim como para os indicadores de produção de água, existe uma relação mais clara entre o custo da água produzida e os investimentos necessários.

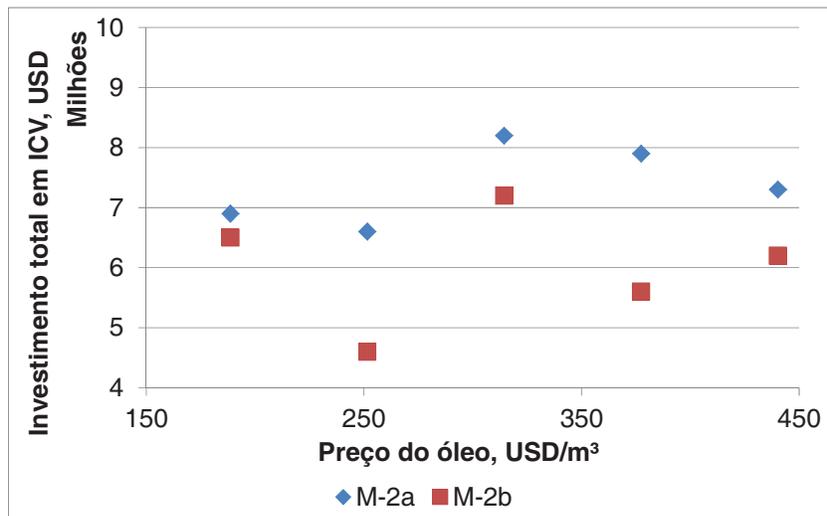


Figura 5-81: Relação entre investimentos necessários para instalação de válvulas de controle e o preço do óleo.

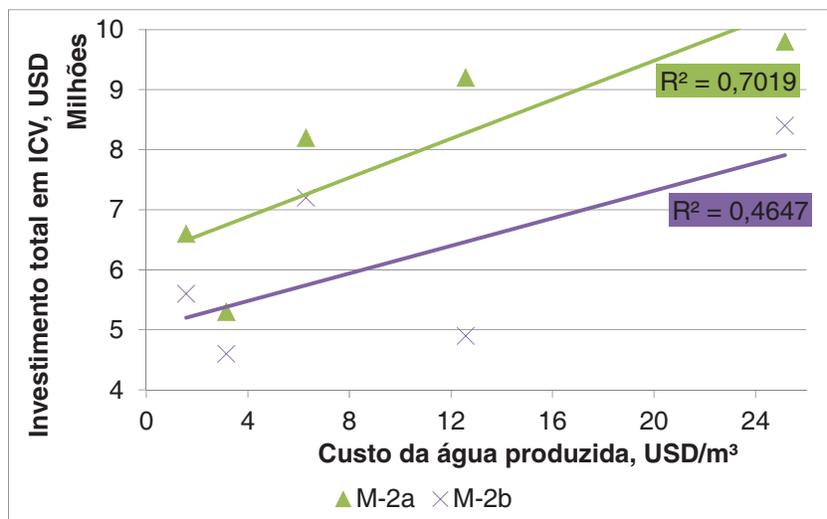


Figura 5-82: Relação entre investimentos necessários para instalação de válvulas de controle e o custo da água.

Alguns destaques analisados nesta seção são resumidos a seguir.

- Observou-se uma maior viabilidade no uso de válvulas de controle para os casos com restrição na produção da plataforma. Este resultado foi obtido para todos os cenários econômicos utilizados.

- Observa-se uma maior variação nos indicadores de produção total de água entre os diferentes cenários econômicos de cada caso do que a variação na produção total de óleo.
- Para os casos com restrição na plataforma, os resultados mostraram um ganho de pelo menos 3 vezes os investimentos necessários.
- Observa-se um aumento no VPL das válvulas de controle com o preço do óleo e também com o custo da água.
- Não foi observada uma relação clara entre o preço do óleo e os indicadores de produção de óleo e investimentos. Este resultado pode ser explicado pelo menor impacto do uso de válvulas de controle nos indicadores da produção de óleo, não sendo possível encontrar uma correlação clara.
- Não foi observada uma tendência clara entre os custos da água produzida e a produção de óleo do campo.
- Foram observadas tendências de aumento da produção total de água com o aumento do preço do óleo.
- O aumento dos custos com a produção de água tende a reduzir a produção total de água. Por outro lado, observa-se uma tendência de aumento da viabilidade das válvulas nesses casos, aumentando a sua capacidade de gerar retorno financeiro.

6. Considerações finais, conclusões e recomendações

Este trabalho apresentou um método de otimização (MOD-P) que utiliza análises de engenharia combinadas com algoritmos matemáticos de otimização para determinar o número e a posição de válvulas de controle de forma mais eficiente e adequada aos problemas práticos de engenharia de reservatórios utilizando simulação de reservatórios. O método MOD-P é um processo iterativo, que avalia diferentes regiões dos poços de forma sequencial para verificar a viabilidade de aplicação de válvulas de controle. Para isso, utilizam-se informações obtidas de simulação de reservatórios para selecionar regiões de poços candidatas e métodos de otimização para encontrar o melhor controle das válvulas.

As principais conclusões deste trabalho são apresentadas aqui para destacar a eficiência do MOD-P, a sua rapidez de convergência, a aplicabilidade de válvulas de controle, as alterações no desempenho do reservatório e a influência do cenário econômico na viabilidade de válvulas de controle. Espera-se que a análise desses aspectos mostrem as vantagens e desvantagens da utilização do método proposto, MOD-P, além das vantagens de poços inteligentes em condições determinísticas.

A comparação entre o método MOD-P e o método de algoritmo evolucionário (AE) mostrou que o método MOD-P obteve bons resultados de VPL. Também foi observado que, para a maior parte dos casos analisados, o método MOD-P obteve uma resposta aproximada ao AE em relação ao número e à posição das válvulas. Além disso, o método foi capaz de atingir a resposta otimizada utilizando um número reduzido de simulações de reservatório. Avaliando o desempenho geral do método de otimização, pode-se concluir que o método de otimização obteve resultados satisfatórios e adequados às atividades práticas de engenharia de reservatórios.

A utilização do exemplo E-1 mostrou que o MOD-P concentra as buscas pelo VPL ótimo em regiões do espaço de solução próximas ao ponto de máximo. A análise dos indicadores técnicos e econômicos do sistema evitou a simulação de soluções muito distantes da solução otimizada, o que em outros métodos que apresentam componentes aleatórias é mais difícil de ser evitado. Como exemplo, evitou-se buscar soluções que fecham regiões mais distantes do canal antes de

regiões mais próximas. Portanto, a aplicação do conhecimento de engenharia no método MOD-P auxiliou na eficiência e na rapidez de convergência.

A aplicação do exemplo E-2 mostrou que, para solucionar problemas com muitas variáveis e com número reduzido de simulações, métodos como algoritmos evolucionários podem ser ineficientes para encontrar boas respostas. Além disso, verificou-se que a correção dos resultados de algoritmos evolucionários melhora de forma significativa a solução do problema. A verificação da necessidade de válvulas de controle para fechar regiões do poço em tempos próximos ao início da produção ou ao término da vida útil melhorou a resposta do método. Portanto, considerando a otimização de número e de posição de válvulas, deve-se aplicar métodos de otimização com componentes aleatórias com cuidado e avaliar as condições técnicas das respostas ao final do processo.

Por outro lado, o método MOD-P foi capaz de melhorar o desempenho econômico do reservatório com o uso de válvulas de controle em condições complexas como do exemplo E-2. Para os casos em que válvulas de controle apresentaram maior viabilidade, o método de otimização aumentou significativamente o VPL do campo. Apesar de neste exemplo não ter sido possível comparar a solução do MOD-P com soluções com VPL próximo ou superior devido à ineficiência do AE, os resultados de uma melhoria de até 12% no VPL são compatíveis com os resultados apresentados na literatura. Portanto, pode-se concluir que o método MOD-P foi eficiente na busca de soluções em casos mais complexos.

Além disso, o número de simulações realizadas para solucionar os casos mostra que o método MOD-P utilizou um número reduzido de simulações também para os casos mais complexos. O número de simulações foi menor do que o número que em geral é necessário para utilizar métodos como algoritmos genéticos. Portanto, pode-se avaliar que o número de simulações foi relativamente baixo e adequado a casos que demandam métodos mais eficientes, convergindo para a solução otimizada com relativa rapidez.

Em relação à aplicabilidade das válvulas de controle, os resultados do exemplo E-1 mostram que as válvulas de controle tiveram melhor desempenho para os casos cujos valores de permeabilidade do canal não eram extremos. Para casos com baixa permeabilidade do canal, a opção de não interferir no escoamento dessas regiões foi melhor e, para o caso com alta permeabilidade,

a opção de não completar essas regiões foi a mais viável. Portanto, a presença de canais de alta permeabilidade nem sempre vai ser vantajosa para o uso de válvulas de controle.

No exemplo E-2, observou-se que as restrições no escoamento de líquidos na plataforma impactaram de forma relevante a viabilidade de aplicação de válvulas de controle em poços. Enquanto que todos os casos com restrição de plataforma apresentaram viabilidade para aplicação de válvulas, apenas um dos casos avaliados sem restrição apresentou viabilidade. Além disso, o caso sem restrição de plataforma que apresentou viabilidade obteve apenas uma válvula de controle. Pode-se concluir que a presença de restrição no escoamento de líquidos em campos de petróleo aumenta a viabilidade para aplicação de válvulas de controle.

A avaliação do desempenho das estratégias otimizadas do exemplo E-1 mostrou que diferentes alterações na produção de fluidos foram estabelecidas. Em geral, a produção de óleo é aumentada com a inclusão de válvulas de controle. Entretanto, para as estratégias em que a melhor opção foi a não completação de regiões do poço, observou-se uma redução na produção de óleo. Por outro lado, todos os exemplos analisados apontaram menor produção acumulada de água ao final da vida útil. Observou-se que a menor produção de óleo está associada à redução relevante da produção de água, enquanto que um aumento na produção de óleo está associado a uma redução menos significativa da produção de água. Portanto, o uso de válvulas de controle pode alterar de forma significativa a produção dos poços, existindo diferentes tipos de alterações que podem levar à viabilidade dos poços.

No exemplo E-2, todos os casos apresentaram alterações que aumentaram a produção acumulada de óleo e diminuíram a produção acumulada de água. O tipo de alteração observado indicou que o melhor controle do campo levou a uma redução na produção de água mais forte do que ao aumento da produção de óleo. Portanto, para as características geológicas do exemplo E-2, a redução na quantidade de água foi importante, mas não gerou uma recuperação de óleo maior na mesma ordem de grandeza.

A análise do exemplo E-2 sobre diferentes cenários econômicos mostrou que os casos em que existia a viabilidade de uso de válvulas foi comprovada a viabilidade foi observada em todos os cenários econômicos estudados. Entretanto, diferentes configurações de número de válvulas

foram encontradas. Portanto, a condição de viabilidade das válvulas foi imposta mais pelas características do reservatório e da estratégia inicial do que pelo cenário econômico.

Ainda no exemplo E-2, foi observada uma relação clara entre a produção total de água com o custo da água e o preço do óleo. Já uma relação da produção acumulada de óleo com o preço do óleo e o custo da água não foi observada na maioria dos casos. Portanto, apesar de haver um impacto significativo na produção de óleo e nas receitas do campo, a produção de água é afetada de forma mais regular pelos diferentes cenários econômicos, sendo possível prever de forma mais clara o comportamento desse indicador técnico para os diferentes custos e preços da água produzida.

Apesar do relativo sucesso em obter uma resposta otimizada para os casos estudados é necessário considerar as limitações do estudo em termos de geologia, estratégia de produção, tipo de válvula associada etc. Portanto, diferentes geologias, métodos de recuperação ou mesmo controle de poços podem favorecer um ou outro método. Entretanto, observou-se neste estudo que a relação entre uma análise de engenharia associada aos métodos de otimização tradicional é fundamental para o sucesso de uma otimização de casos práticos.

Recomenda-se para trabalhos futuros uma avaliação de três aspectos do método proposto para que seja aplicado a um maior número de casos:

1. estudo dos indicadores de reservatório que melhor se adéquam a outras condições de escoamento, por exemplo, que contenham gás ou outros fluidos indesejados;
2. estudo de viabilidade de uso de métodos de otimização ao invés de indicadores de projeto para determinação do tamanho da região controlada por válvulas;
3. aplicação de métodos de otimização mais complexos para determinação da melhor configuração do controle de válvulas que possibilitam a aplicação e análise de controles mais sofisticados do que a válvula tipo abre-fecha.

REFERÊNCIAS

ADAMS, E. W. **Digital Characterization of Trombolite-Stromatolite Reef Distribution in a Carbonate Ramp System.** AAPG Bulletin. volume 89, N°. 10, 2005.

AITOKHUEHI, I., DURLOFSKY, L. J. **Optimizing the performance of smart wells in complex reservoir using continuously updated geological models.** Journal of Petroleum Science Engineering 48 (2005): 254-264, doi:10.1016/j.petrol.2005.06.004.

AL-DHUBAIB, T. A. **Intelligent Fields: Industry.** In: SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Manama, Bahrain, Setembro 25-28, 2011.

ALGHAREEB, Z. M., HORNE, R. N., YUEN, B. B., SHENAWI, S. H. **Proactive Optimization of Oil Recovery in Multilateral Wells Using Real Time Production Data.** In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, E.U.A, Outubro, 2009.

ALHUTHALI, A. H., DATTA-GUPTA, A., YUEN, B. J., FONTANILLA, P. **Optimizing smart wells controls under geologic uncertainties.** Journal of Petroleum Science Engineering 73 (2010): 107-121, doi:10.1016/j.petrol.2010.05.012.

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 Engineering 73 (2010): 129-140, doi:10.1016/j.petrol.2010.05.013.

ARAMAYO, J. L. S., SILVEIRA, R. R., ALMEIDA, M. R., DANTAS, T. N. C. **A conceptual model for project management of exploration and production in the oil and gas industry: The case of a Brazilian company.** International Journal of Project Management, 31 (2013) 589–601, doi:10.1016/j.ijproman.2012.09.016.

ASADOLLAHI, M., NÆVDAL, G., SHAFIEIRAD, A. **Efficient workflow for optimizing well controls.** Journal of Petroleum Science Engineering 82-83 (2012) 66-74. doi: 10.1016/j.petrol.2011.12.023.

BARRETO, C. E. A. G., MUNERATO, F. P., RAVAGNANI, A. T. F. S. G., SCHIOZER, D. J. **Use of Water Cut to Optimize Conventional and Smart Wells Operation.** In: SPE North Africa Technical Conference & Exhibition, Cairo, Egito, 20-22, fevereiro, 2012.

BECKNER, B. L., SONG, X. **Field Development Using Simulated Annealing – Optimal Economical Well Scheduling and Placement.** In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, EUA, Outubro, 1995.

BEDFORD, T.; COOKE, R. **Probabilistic risk analysis: Foundations and methods.** 4th Edition. Cambridge University Press, 2006, Cambridge, Reino Unido.

BEQUETE, B. W. **Process control – Modeling, design and simulation.** Prentice Hall, New Jersey, E.U.A, 2003.

BIROLINI, A. **Reliability engineering: Theory and practice.** 4th Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Nova York, E.U.A., 2004, doi: 10.1007/978-3-662-05409-3.

BOTECHIA, V. E. **Análise de Desempenho de Poços na Seleção da Estratégia de Produção de Petróleo sob Incertezas.** 2012. 127 p. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CHACON, A., McCUTCHEON, J. B., ARIAS, B., WEDGWOOD, J. M. (2007). **Na Kika Field Experiences in the Use of Intelligent Well Technology to Improve Reservoir Management.** In: International Petroleum Technology Conference, Dubai, U.A.E. 4-6, dezembro, 2007.

CHUCKWUEKE, V., CONSTANTINE, J. **EA Field Development: intelligent well completion, offshore Nigeria.** In: Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Abuja, Nigeria, 2-4 Agosto, 2004.

COSTA, L. R. F. (Org). **Engenharia de sistemas: planejamento e controle de projetos.** 1^a Edição. Editora Vozes, Petrópolis, Rio de Janeiro, Brasil, 1972.

CULLICK, A. S., NARAYANAN, K., GORELL, S. **Optimal field development planning of well locations with reservoir uncertainty.** In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, E.U.A. 9-12, Outubro, 2005.

DAKE, L. P. **Fundamentals of reservoir engineering**. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1978.

DANTZIG, G. B., WOLFE, P. **Decomposition principle for linear programming**. Operations Research 8 (1960): 101-111.

DEHDARI, V., OLIVER, D. S. **Sequential quadratic programming (SQP) for solving constrained production optimization** – case study from Brugge Field. In: SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, Texas, E.U.A, 2011.

DELANEY, W., VACCARI, E. **Dynamic models and discrete event simulation**. 1st Edition, Marcel Dekker, Inc., New York, New York, U.S.A. 1989.

DOUBLET, D. C., AANONSEN, S. I., TAI, X. **An efficient method for smart well production optimization**. Journal of Petroleum Science Engineering 69 (2009):25-39, doi: 10.1016/j.petrol.2009.06.008.

EBADAT, A., KARIMAGHAEI, P. **Well placement optimization according to field production curve using gradient-based control methods through dynamic modeling**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 100 (2012) 178–188, doi: 10.1016/j.petrol.2012.08.014.

EDGAR, T. F., HIMMELBLAU, D. M., LADSON, L. S. **Optimization of chemical process**. 2nd edition, McGraw-Hill, Nova York, Nova York, E.U.A. 2001.

EMERICK, A. A., PORTELLA, R. C. M. **Production Optimization with Intelligent Wells**. In: SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, 2007.

FILIP, F. G. **Decision support and control for large-scale complex system**. Annual Reviews in Control 32 (2008): 61-70, doi:10.1016/j.arcontrol.2008.03.002.

GHARBI, R. **Application of an expert system to optimize reservoir performance**. Journal of Petroleum Science and Engineering 49 (2005): 261-273, doi:10.1016/j.petrol.2005.05.008.

GODA, T., SATO, K. **History matching with iterative Latin hypercube samplings and parameterization of reservoir heterogeneity**. Journal of Petroleum Science and Engineering 114 (2014): 261-273, doi:10.1016/j.petrol.2005.05.008.

GOLDBERG, D. E., **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., E.U.A, 1989.

IYER, R. R., GROSSMANN, I. E. **Optimal planning and scheduling of offshore oil field infrastructure investment and operations**. *Industrial & Engineering Chemical Research* 37 (1998): 1380-1397, doi: 10.1021/ie970532x.

KHARGHORIA, A., ZHANG, F., LI, R., JALALI, Y. **Application of Distributed Electrical Measurements and Inflow Control in Horizontal Wells under Bottom-Water Drive**. In: SPE 13^o European Petroleum Conference, Aberdeen, Escócia, outubro, 2002.

KIRCHSTEIGER, C. **On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis**. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 12 (1999) 399-419.

KOEHLER, J. R., OWEN, A. B. **Computer experiments**. *Handbook of statistics* 13.13 (1996): 261-308.

KOSMIDIS, V. D., PERKINS, J. D., PISTIKOPOULOS, E. N. **A mixed integer optimization formulation for the well scheduling problem on petroleum fields**. *Computers and Chemical Engineering* 29 (2005) 1523–1541, doi:10.1016/j.compchemeng.2004.12.003.

KULKARNI, R.N., BELSVIK, Y.H., REME A.B. **Smart-Well Monitoring and Control: Snorre B Experience**. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, E.U.A. 11-14, novembro, 2007.

LIN, J., WECK, O., MacGOWAN, D. **Modeling epistemic subsurface reservoir uncertainty using a reverse Wiener jump-diffusion process**. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 84-85 (2012) 8-19. doi: 10.1016/j.petrol.2012.01.015.

MAGALHÃES, T. C. B., MARTINI, R. F., SCHIOZER, D. J. **The influence of production system constraints on the reservoir strategy optimization**. *Anais do 18^o International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, 6-11, novembro, 2005.

MASCHIO, C., CARVALHO, C. P. V., SCHIOZER, D. J. **A new methodology to reduce uncertainties in reservoir simulation models using observed data and sampling techniques**. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 72 (2010) 110-119. doi: 10.1016/j.petrol.2010.03.008.

MATLAB, The language of technical computing, Math Works Inc., 2012.

MEZZOMO, C. C., SCHIOZER, D. J. **Field Development Planning Optimization Using Reservoir Simulation**. In: Second Meeting on Reservoir Simulation, Buenos Aires, Argentina, 5-6, novembro, 2002.

NÆVDAL, G., BROUWER, D. R., JANSEN, J. **Waterflooding using closed-loop control**. Computational geoscience 10 (2006): 37-60, doi: 10.1007/s10596-005-9010-6.

NAKAJIMA, L., SCHIOZER, D. J. **Horizontal Well Placement Optimization Using Quality Map Definition**. In: Canadian International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canadá, 10-12, junho, 2003.

OGUNNAIKE, A. B., RAY, W. H. **Process Dynamics, Modeling, and Control**. Oxford University Press, Nova York, 1994.

PINTO, M. A. S. **Método de Otimização Assistido para Comparação entre Poços Convencionais e Inteligentes Considerando Incertezas**. Tese de Doutorado (em Ciências e Engenharia de Petróleo). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

RAHMAWATI, S. D., WHITSON, C. H., FOSS, B., KUNTADI, A. **Integrated field operation and optimization**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 81 (2012) 161–170, doi:10.1016/j.petrol.2011.12.027.

RAO, S. S. **Engineering optimization – Theory and practice**, Third edition, John Wiley & Sons, Inc., Nova York, E.U.A, 1996.

RAVAGNANI, A. T. S. G., MAZO, E. O. M., SCHIOZER, D. J. **A Case Study of the Structure of the Process for Production Strategy Selection**. International Journal of Modeling and Simulation for the Petroleum Industry. Vol. 4-5, p. 9-15, 2011.

RUDD, D. F., WATSON, C. C. **Strategy of process engineering**, John Wiley & Sons, Inc., Nova York, E.U.A. 1968.

SAGE, A. P. **Methodology for Large-scale systems**. MacGraw-Hill Book Company, Nova York, E.U.A. 1977.

SILVA Jr., M. F., PORTELLA, R. C. M., IZETTI, R. G., CAMPOS, S. R. V. **Technologies Trials of Intelligent-Field Implementation in Carmopolis Field**. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 9-12 Outubro, 2005.

SILVA, J. P. Q. G. **Uso de Poços Inteligentes em Desenvolvimento de Campos de Petróleo sob Incertezas**. 2008. 118 p. Dissertação de Mestrado. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SIMPSON, T. W., BOOKER, A. J., GIUNTA, A. A., KOCH, P. N., YANG, R. J. **Approximation methods in multidisciplinary analysis and optimization: a panel discussion**. Structural and Multidisciplinary Optimization 27, 302-313 (2004), doi: 10.1007/s00158-004-0389-9.

SU, H. **Smart Well Production Optimization Using an Ensemble-Based Method**. In: SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium, AlKhobar, Saudi Arabia, 9-11, maio, 2009.

VALVATNE, P. H., SERVE, J., DURLOFSKY, L. J., AZIZ, K. **Efficient modeling of nonconventional wells with downhole inflow control valves**. Journal of Petroleum Science Engineering 39 (2003): 99-116, doi:10.1016/S0920-4105(03)00042-1.

WANG, P., LITVAK, M., AZIZ, K. **Optimization of production operations in petroleum fields**. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, E.U.A. 29 de setembro – 2 de outubro, 2002

WILLERSRUD, A., IMSLAND, L., HAUGER, S. O., KITILSEN, P. **Short-term production optimization of offshore oil and gas production using nonlinear model predictive control**. Journal of Process Control, 23 (2013) 215– 223. doi: 10.1016/j.jprocont.2012.08.005.

YAO, W., CHEN, X., LUO, W., VAN TOOREN, M., GUO, J. **Review of uncertainty-based multidisciplinary design optimization methods for aerospace vehicles**. Progress in Aerospace Sciences 47 (2011) 450-479.

YETEN, B., BROUWER, D. R., DURLOFSKY, L. J., AZIZ, K. **Decision analysis under uncertainty for smart well deployment**. Journal of Petroleum Science Engineering 43 (2004): 183-199, doi:10.1016/j.petrol.2006.12.008.

ZANDVLIET, M. J., BOSGRA, O. H., JANSEN, J. D., VAN DEN HOF, P. M. J., KRAAIJEVANGER, J. F. B. M. **Bang-bang control and singular arcs in reservoir flooding.** Journal of Petroleum Science Engineering 58 (2007): 186-200, doi:10.1016/j.petrol.2006.12.008.

ZHANG, K., LI, G., REYNOLDS, A. C., YAO, J., ZHANG, L. **Optimal well placement using an adjoint gradient.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 73 (2010) 220–226, doi:10.1016/j.petrol.2010.07.002.