UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

HELENA KATZ DE FREITAS LINS

MÉTODOS BASEADOS EM MODELOS DINÂMICOS DE CAPACITÂNCIA E RESISTÊNCIA EM RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO DE MÚLTIPLAS CAMADAS

RECIFE
2018

HELENA KATZ DE FREITAS LINS

MÉTODOS BASEADOS EM MODELOS DE CAPACITÂNCIA E RESISTÊNCIA DINÂMICOS EM RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO DE MÚLTIPLAS CAMADAS

Dissertação submetida ao corpo docente do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Simulação e Gerenciamento de Reservatórios de Petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Horowitz

Recife

2018

Catalogação na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

L759m Lins, Helena Katz de Freitas.
Métodos baseados em modelos de capacitância e resistência dinâmicos em reservatórios de petróleo de múltiplas camadas / Helena Katz de Freitas Lins. - 2018.
169 folhas, il.; tab., abr., sigl. e simb.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Horowitz.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Simulação de reservatórios. 3. Otimização restrita. 4. CRM. 5. Conectividades. 6. Múltiplas camadas. I. Horowitz, Bernardo (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2018-264

MÉTODOS BASEADOS EM MODELOS DINÂMICOS DE CAPACITÂNCIA E RESISTÊNCIA EM RESERVATÓRIOS DE PETROLEO DE MULTIPLAS CAMADAS

Defesa de Dissertação de Mestrado defendida por

Helena Katz de Freitas Lins

Considera a candidata APROVADA

Recife, 18 de maio de 2018

Banca Examinadora:

_____

Prof. Dr. Bernardo Horowitz - UFPE

(orientador)

_____

Prof. Dr. Leonardo Correia de Oliveira – UFPE

(examinador externo)

_____

Prof.ª Dr.ª Silvana Maria Bastos Afonso da Silva – UFPE

(examinadora interna)

Dedico este trabalho aos meus pais, ao meu marido e aos meus filhos, pelo amor que tenho por cada um deles.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo aos meus pais, Getúlio e Geni, por sempre vibrarem com meus progressos e me incentivarem a buscar mais, por terem me ensinado o valor da educação. Minha Mãe Geni pelo incentivo que sempre me dá, o apoio incondicional, por estar sempre perto e disposta a ajudar no que for preciso. Meu pai, Getúlio, que sempre esteve ao meu lado, sempre me ensinou, e durante esse trabalho, quando uma dúvida em matemática surgia, era sempre nele que eu pensava, se estivesse aqui, certamente teria esclarecido e feito questão de participar desse meu aprendizado em otimização.

Um Agradecimento com muito carinho ao meu marido Daniel, que me deu todo o apoio para a realização deste trabalho. Me incentivou desde o dia da inscrição e esteve ao meu lado durante todo o tempo. Foi compreensivo e companheiro em todos os momentos. Aos meus amados filhos, que são o meu maior presente, Roni e Danilo, que apesar da idade, já compreenderam os momentos que precisei da colaboração deles para estudar.

Aos meus irmãos, Zeev e David, pelo apoio e parceria que sempre tiveram comigo. Aos meus Tios Fred e Silvia pelo incentivo, pelo interesse, pelos conselhos e por sempre estarem disponíveis. E toda a minha família que torceu por mim!

As minhas amigas Ana Maria e Karinne, companheiras maravilhosas do mestrado. Aos amigos do mestrado, em especial a Artur, Jean, Kewin e Ricardo, pela recepção, pelos estudos em conjunto e por todo apoio durante as disciplinas e no desenvolvimento desse trabalho. Amizade que se construiu e tornou o trabalho bem mais prazeroso!

Um agradecimento em negrito a Juan Alberto! Foi um privilégio tê-lo me acompanhando desde o começo deste trabalho, compartilhou comigo suas experiências acadêmicas, em pesquisa, conhecimentos, sempre me ajudando nas dificuldades que apareciam, qualquer que fosse! Agradeço pelo seu tempo, pela paciência, pela sua disposição, pela amizade, enfim, por tudo que fez por mim. Gratidão!

Um agradecimento muito especial ao meu orientador Bernardo Horowitz pela oportunidade de trabalhar com ele, de compartilhar dos seus conhecimentos, pela sua disponibilidade e tempo que me dedicou, pelos seus ensinamentos e principalmente por ter acreditado em mim. Meu muito obrigada!

Ao CNPQ e a CMG pelo suporte econômico para a realização desta pesquisa.

RESUMO

Os simuladores de reservatórios tradicionais necessitam detalhados balanços de massa além de estimativa de vários parâmetros geológicos. Simplificar os modelos para simulação dos reservatórios tem sido um desafio e nesse contexto se iniciaram os estudos do modelo de capacitância e resistência *(Capacitance Resistance Model*, CRM), que é um modelo simplificado de simulação de reservatórios o qual utiliza como dados o histórico de injeção, produção e pressão de fundo de poço (*(Bottom Hole Pressure*, BHP).

No CRM clássico, o cálculo dos seus parâmetros é realizado considerando o reservatório compactado em uma única camada. Além disso, os parâmetros são fixos, ou seja, não mudam de acordo com abertura ou fechamento de poços, eventos que podem ocorrer durante o tempo de concessão.

Neste estudo, estratégias do CRM foram implementadas considerando as diferentes características geológicas entre as camadas do reservatório, o que diferencia o comportamento do fluxo dos fluidos entre elas. Para isso, os parâmetros foram calculados para cada uma das camadas. Além disso, o cálculo foi realizado de forma dinâmica, ou seja, os parâmetros foram recalculados de acordo com ocorrência de abertura ou fechamento de poços durante o tempo de produção.

Foi também estudado o modelo CRM em reservatórios nos quais ocorre a conversão de um poço produtor. Essa técnica pode ser utilizada quando um poço produtor produz prematuramente um percentual alto de água, não sendo mais economicamente viável.

Para realizar o estudo, foi utilizado um modelo sintético, com três camadas de diferentes permeabilidades, canais de alta permeabilidade e falha selante e também outro modelo, também sintético, porém mais realista, que é o Brush Canyon Outcrop.

A determinação dos parâmetros do modelo é realizada através de ferramentas de otimização, na qual a função objetivo é a soma dos quadrados das diferenças entre a vazão observada e calculada para o produtor. Para resolução do problema de otimização, é utilizada uma estratégia que o dividide em dois: acoplado e desacoplado, com a vantagem de resolver inicialmente um problema mais simples (desacoplado), utilizando a técnica dos mínimos quadrados e gera um "*warm start*" para o problema acoplado, diminuindo assim a quantidade de iterações deste último, o qual é resolvido através da técnica Programação Quadrática Sequencial *(sequential quadratic programming*, SQP*)*.

Para verificação são comparadas as curvas das vazões dos produtores calculadas, utilizando os parâmetros determinados na otimização, e observadas. As curvas mostram que essas estratégias capturam com mais acurácia a dinâmica natural do reservatório e tem como resultados conectividades que se ajustam melhor ao modelo real do reservatório, quando comparados com outros métodos da literatura.

Palavras chave: Simulação de reservatórios. Otimização restrita. CRM. Conectividades. Múltiplas camadas.

ABSTRACT

The traditional reservoir simulators require detailed mass balance, high computational cost and estimation of several geological parameters. Simplifying models for reservoir simulators has been a challenge. This was the context where studies of Capacitance and Resistance models (CRM) started. CRM is a simplified reservoir simulation model based only on injection, production and bottom hole pressure (BHP) data.

In classic CRM, the calculation of its parameters is performed considering the reservoir lumped in a single layer. Thus, heterogeneities among its layers are not considered. It also does not consider in its parameter calculations any opening or shutting of wells, which may occur over the concession period, keeping them unchanged. However, parameters change as wells are opened, closed, or converted.

In this study, CRM strategies were implemented taking into account that the oil reservoirs are highly heterogeneous, and their layers may have different geological characteristics among them, and this differentiates the fluid flow behavior among them. For this sake, the reservoir was divided into layers and the parameters were calculated for each one of them. Besides, the calculation was performed dynamically, i.e. the parameters were recalculated according to opening or shutting of wells during the production time.

The CRM model was also studied when applied in reservoirs in which the conversion of a producing well into injector takes place. If a producer well reaches an early water-cut it can be no longer profitable and can be advantageous to convert it to an injector well.

To perform the study, a synthetic model with three layers of different permeabilities, two high permeability channels and sealant fault was used. Another model, also synthetic but more realistic was also used, the Brush Canyon Outcrop.

Parameters are determined through an optimization procedure, which minimizes the sum of the squares of the differences between calculated and observed producer rates. To solve the optimization problem its calculation is divided into two problems: coupled and uncoupled. This strategy has the advantage of initially solving a more simple problem (uncoupled) using the least squares technique and generates a warm start for the coupled problem, thus reducing the amount of iterations of the latter, which is solved through the SQP (Sequential Quadratic Programming) technique.

For verification, calculation of the flow rates of the producers, using the optimized parameters, are compared with the historical data. It showed that these strategies capture more efficiently the natural dynamics of the reservoir and result in connectivities values that best fit the actual model when compared with other literature methods.

Keywords: Reservoir simulation. Constrained optimization. CRM. Connectivities. Multilayerd.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do impacto da vazão de injeção e BHP na vazão de produção de um reservatório arbitrário. 29
Figura 2 - Contribuição da vazão do injetor e também outros injetores do campo na vazão dos produtores. 33
Figura 3 - balanço material do reservatório. 35
Figura 4 - Representação das conectividades dos injetores para o produtor j 38
Figura 5 - Balanço de massa do reservatório representado por camadas. 44
Figura 6 - Evolução das conectividades ao longo da simulação. 48
Figura 7 - Variação aleatória da vazão de injeção como dado de entrada. 52
Figura 8 – Conectividades entre o injetor i e os produtores. 54
Figura 9 - Comparação das respostas (vazão de produção) com diferentes conectividades para uma série de variações no sinal de entrada (vazão de injeção) 55
Figura 10 - Representação das mudanças das conectividades como consequência do fechamento de um poço. 58
Figura 11 - Caso 1 e mapa das permeabilidades. 77
Figura 12 - Permeabilidade por camadas caso 1: (a) primeira camada. (b) Segunda camada. (c) Terceira camada. 77
Figura 13 - Produção de diversas zonas a partir de um mesmo poço completado em todas as camadas, com válvulas de controle. 79
Figura 14 - Caso 1 com canais de alta permeabilidade e mapa das permeabilidades. 80
Figura 15 - Permeabilidade por camada, caso 1 com canais de alta permeabilidade: (a) primeira camada, (b) segunda camada e (c) terceira camada. 80
Figura 16 - Caso 1 com falha selante e mapa de permeabilidades. 82
Figura 17 - Permeabilidade por camadas caso 1 com falha selante: (a) primeira camada, (b) segunda camada e (c) terceira camada. 82
Figura 18 - Caso 1 com falha selante e mapa de permeabilidade. 84
Figura 19 - Permeabilidade por camadas caso 1 com canais de alta permeabilidade: (a) primeira camada, (b) segunda camada e (c) terceira camada. 84
Figura 20 - Conectividades entre os pares de poços produtores/injetores, caso 1 com canais de alta permeabilidade 88

Figura 21 - Conectividades entre o injetor I-3 e os produtores. 90
Figura 22 - Ajuste entre as curvas das vazões de produção calculada e observada para o poço P-3 91
Figura 23 - Gráfico da figura 22 ampliado. 92
Figura 24 - Ajuste entre as curvas das vazões de produção calculada e observada para o poço P-4 92
Figura 25 - Gráfico da figura 24 ampliado. 93
Figura 26 - Conectividades entre os pares de poços produtores/injetores, caso 1 com canais com falha selante. 96
Figura 27 - Ajuste entre as curvas das vazões de produção calculada e observada para o poço P-3. 97
Figura 28 - Gráfico ampliado da figura 27. 98
Figura 29 - Ajuste entre as curvas das vazões de produção calculada e observada para o poço P-4. 98
Figura 30 - Gráfico da figura 29 ampliado. 99
Figura 31 - Conectividades entre os pares de poços produtores/injetores, caso 1 com canais com falha selante. 101
Figura 32 - Ajuste entre as curvas das vazões de produção calculada e observada para o poço P-1 102
Figura 33 - Ajuste entre as curvas das vazões de produção calculada e observada para o poço P-2. 103
Figura 34 - Ajuste de curvas (a) Utilizando os dados do BHP. (b) Sem utilizar dados do BHP. 108
Figura 35 - Ajuste das curvas da vazão calculada e observada com a vazão inicial como parâmetro da otimização. 111
Figura 36 - Ajuste das curvas da vazão calculada e observada com a vazão inicial como parâmetro da otimização. 112
Figura 37 - Ajuste das curvas da vazão calculada e observada com a vazão inicial como parâmetro da otimização. 112
Figura 38 - Ajuste das curvas da vazão calculada e observada com a vazão inicial como parâmetro da otimização. 113

Figura 39 - Conectividades entre os pares de poços produtores/injetores, calculadas pelo CRMP. 115
Figura 40 - Conectividades entre os pares de poços produtores/injetores, calculadas pelo CRM-MLMTC. 116
Figura 41 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas do produtor P-2 calculadas pelos CRMP, CRM- ML e CRM-MLMTC e observadas. (a) Intervalo um. (b) Intervalo dois. (c) Intervalo três. 117
Figura 42 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculada e observada durante o intervalo 3 118
Figura 43 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. (a) Intervalo 1. (b) Intervalo 2. (c) Intervalo 3..... 119
Figura 44 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. 120
Figura 45 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. 121
Figura 46 - Comparação do ajuste das curvas das vazões calculadas e observadas. 121
Figura 47 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. (a) Intervalo 1. (b) Intervalo 2. (c) Intervalo 3..... 122
Figura 48 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. 123
Figura 49 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. (a) Intervalo 1. (b) Intervalo 2. (c) Intervalo 3..... 124
Figura 50 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. 125
Figura 51 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. 125
Figura 52 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. 126
Figura 53 - Comparação do ajuste das curvas das vazões calculadas e observadas. (a) Intervalo 1. (b) Intervalo 2. (c) Intervalo 3..... 127
Figura 54 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. 128
Figura 55 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. (a) Intervalo 1. (b) Intervalo 2. (c) Intervalo 3..... 129
Figura 56 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. 130
Figura 57 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. 130
Figura 58 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. 131

Figura 59 Modelo BCO com conversão do poço produtor a partir do ciclo 2 até o ciclo 6 - (a) primeiro ciclo (b) do segundo ciclo em diante (até o sexto) (c) Mapa de permeabilidade na direção I.....133
Figura 60 - Perfil da permeabilidade nas camadas 4, 5 e 6, nas quais P-2 está completado, e mapa de permeabilidade.....134
Figura 61 – Corte de água dos poços produtores durante a simulação. 134
Figura 62 - Divisão da simulação em intervalos de tempo. 136
Figura 63 - Conectividades do modelo BCO para a simulação em 6 intervalos.....137
Figura 64 - Gráficos do ajuste entre as curvas das vazões líquidas de produção calculadas e observadas, nos 6 intervalos da simulação, para o produtor P-2.....139
Figura 65 - Gráficos do ajuste entre as curvas das vazões líquidas de produção calculadas e observadas, nos 6 intervalos da simulação.....140
Figura 66 Conectividades do modelo BCO para a simulação em 4 intervalos. 142
Figura 67 - Gráficos do ajuste entre as curvas das vazões líquidas calculadas e observadas.143
Figura 68 - Comparação entre as curvas das vazões observadas e calculadas com os parâmetros determinados a partir do estudo com 6 intervalos e com 4 intervalos.....144
Figura 69 - Comparação entre as curvas das vazões observadas e as curvas das vazões calculadas com os parâmetros determinados a partir do estudo com 6 intervalos e com 4 intervalos, nos primeiros 4000 dias.....145
Figura 70 - Comparação entre as curvas das vazões observadas e calculadas com os parâmetros determinados a partir do estudo com 6 intervalos e com 4 intervalos, dos 4000 aos 6500 dias. 146
Figura 71 – Comparação entre as curvas das vazões observadas e as curvas das vazões calculadas com os parâmetros determinados a partir do estudo com 6 e com 4 intervalos, dos 6500 dias até o final da simulação.....146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de parâmetros para cada formulação do CRM, como função da disponibilidade dos dados do BHP e das vazões iniciais dos poços produtores. 64
Tabela 2 - Comparação dos problemas desacoplado e acoplado. 73
Tabela 3 - Características principais do modelo sintético. 76
Tabela 4 - Conectividades entre os poços P-2 e I-3. Em destaque as conectividades na camada 1, onde há o canal de alta permeabilidade entre este par de poços. 87
Tabela 5 - Conectividades entre os poços P-3 e I-2. Em destaque as conectividades na camada 3, onde há o canal de alta permeabilidade entre este par de poços. 87
Tabela 6 - Conectividades entre os poços P-3 e I-2, localizados em lados opostos da falha. ..94
Tabela 7 - Conectividades entre os poços P-3 e I-3, localizados do mesmo lado da falha. 94
Tabela 8 - Resultados das conectividades para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, calculadas pelo CRMP utilizando os dados do BHP. 105
Tabela 9 - Resultados das conectividades para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, calculadas pelo, CRMP sem utilização dos dados do BHP. 105
Tabela 10 - Resultados das conectividades para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, calculadas pelo CRM-ML utilizando os dados do BHP. 106
Tabela 11 - Resultados das conectividades para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, calculadas pelo CRM-ML sem utilização dos dados do BHP. 106
Tabela 12 - Resultados das conectividades para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, calculadas pelo CRM-MLMTC utilizando os dados do BHP. 107
Tabela 13 - Resultados das conectividades para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, calculadas pelo CRM-MLMTC sem utilização dos dados do BHP. 107
Tabela 14 - Comparação entre a vazão inicial observada (IMEX) e calculada através de otimização para P-1. 110
Tabela 15 - Comparação da vazão inicial observada (IMEX) e calculada através de otimização para P-2. 110
Tabela 16 - Comparação entre a vazão inicial observada (IMEX) e calculada através de otimização para P-3. 110
Tabela 17 - Comparação entre a vazão inicial observada (IMEX) e calculada através de otimização para P-4. 110
Tabela 18 - Status dos poços nos intervalos durante a simulação 114

Tabela 19 - Características do modelo BCO 132
Tabela 20 – Completações do modelo BCO. 133
Tabela 21- Comparação da produção acumulada de líquido do reservatório. 147

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BCO - Brush Canyon Outcrop

BFGS - Broyden –Fletcher – Goldfarb – Shanno

BHP - Pressão de fundo de poço *(Bottom Hole Pressure)*

BMLR - Regressão linear multivariada balanceada *(Balanced Multivariate linear regression)*

CMG - *Computer Modelling Group Ltd.*

CRM - Modelo de Capacitância e Resistência *(Capacitance Resistance Model)*

CRMIP - Modelo de Capacitância e Resistência baseado no par injetor produtor *(Capacitance Resistance Model Injector- Producer pair-Based)*

CRMP - Modelo de Capacitância e Resistência baseado no produtor *(Capacitance Resistance Model Producer-Based)*

CRMP-D - Modelo de Capacitância e Resistência baseado no produtor – Dinâmico (*Capacitance Resistance Model - producer based – Dynamic)*

CRM-ML – Modelo de Capacitância e Resistência Multi-layer (*Capacitance Resistance Model -Multi-Layer)*

CRM-MLMTC - Modelo de Capacitância e Resistência Multi-layer-multiplas constantes do tempo (*Capacitance Resistance Model - Multi-Layer Multi-Response Time Constant)*

CRMT - Modelo de Capacitância e Resistência representado por um tanque (*Capacitance Resistance Model Single Tank Representation)*

DFP - David – Fletcher - Powell

KKT - Karush-Kuhn-Tucker

Lsqnonlin - Mínimos quadrados não lineares *(Least squares non linear)*

MLR - regressão linear multivariada *(Multivariate linear regression)*

QP - Problema quadrático (*Quadratic problem)*

SQP - Programação quadrática sequencial (*Sequential Quadratic Programming*)

VPL – Valor presente líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

Romanos:

Escalares

A	Área transversal do fluxo
C_0	Compressibilidade do óleo
C_r	compressibilidade da rocha
c_t	Compressibilidade total
C_w	Compressibilidade da água
dp^j	Pressão média do volume drenado pelo produtor
d^k	Direção de busca
i	Poço Injetor
I	Número de injetores
I_i	Vazão de injeção
j	Poço produtor
J	Índice de produtividade de um poço produtor j
k	Passo de tempo
k	Permeabilidade absoluta
k_r	Permeabilidade relativa
L	Caminho médio para o fluido chegar do injetor I no produtor j
N_I	Número de injetores
N_P	Número de poços produtores
N_l	Número de camadas do reservatório
N_{par}	Número de parâmetros da otimização
N_{P_ativos}	Número de poços ativos
N_t	Número de passos de tempo da simulação
p_{wf}^j	Pressão de fundo de poço
$\overline{p^j(t)}$	Pressão média do reservatório
q_j	Vazão de produção
$q^{j,\mathrm{cal}}$	Vazões de produção calculada
$q^{j,obs}$	Vazões de produção observada
$Q^{j\alpha}$	Vazão do produtor *j* na camada α
S_0	Saturação do óleo
S_w	Saturação da água
T_{ij}	Transmissibilidade média entre um par de poços produtor/injetor

Gregos:

Escalares

α	Camadas do reservatório
α	Valor do passo
γ	Filtro
λ_{ij}	Conectividade entre um par de poços injetor i e produtor j
μ	Viscosidade do fluido
v_p	Volume poroso (poros conectados)
ξ	Variável de integração
τ_j	Constante de tempo de um poço produtor j

Vetores e Matrizes

λ	Vetor com multiplicadores de Lagrange
∇	Gradiente
H	Matriz Hessiana
∂	Derivada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19
1.1 MOTIVAÇÃO 19
1.1.1 Reservatórios de Petróleo 22
1.2 OBJETIVOS 23
1.3 METODOLOGIA 23
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 27
2 ESTUDO DO MODELO DE CAPACITÂNCIA E RESISTÊNCIA 29
2.1 EVOLUÇÃO DO CRM 30
3 RESERVATÓRIOS DE MÚLTIPLAS CAMADAS E PARÂMETROS DINÂMICOS 43
3.1 CRM MÚLTIPLAS CAMADAS MÚLTIPLAS CONSTANTES DO TEMPO (CRM-MLMTC) 44
3.2 CRM MÚLTIPLAS CAMADAS (CRM-ML) 46
3.3 MODELO DE CAPACITÂNCIA E RESISTÊNCIA DINÂMICO 47
4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO 49
4.1 PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO 49
4.1.1 Dados para Determinação dos Parâmetros 51
4.1.2 Parâmetros do CRM 53
4.1.3 Restrições 61
4.1.4 Quantidade de Parâmetros no Problema de Otimização 62
4.2 ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO 64
4.2.1 Problema Desacoplado 68
4.2.2 Problema Acoplado 71
4.2.3 Resumo 73
5 CASOS ESTUDADOS E RESULTADOS **74**
5.1 CASO 1 E SUAS VARIAÇÕES – EXEMPLOS A, B, C 75
5.1.1 Resultados do Cálculo dos Parâmetros dos Exemplos a, b, c 85
5.2 MODELO BRUSH CANYON OUTCROP (BCO) MODIFICADO. 132
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES **149**
6.1 CONCLUSÕES 149
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 150
REFERÊNCIAS **152**

APENDICE A - RESULTADOS DOS PARÂMETROS PARA O CASO 1 COM CANAIS DE ALTA PERMEABILIDADE 155

APENDICE B - RESULTADOS DOS PARÂMETROS PARA O CASO 1 COM FALHA SELANTE..... 157

APÊNDICE C - RESULTADOS DOS PARÂMETROS PARA O CASO 1COM CANAIS DE ALTA PERMEABILIDADE E FALHA SELANTE 159

APÊNDICE D - RESULTADOS DOS PARÂMETROS PARA O CASO 1 COM CANAIS DE ALTA PERMEABILIDADE, CALCULADOS DE FORMA DINÂMICA 161

APÊNDICE E - RESULTADOS DOS PARÂMETROS CASO BCO COM 6 INTERVALOS. 165

APÊNDICE F - RESULTADOS DOS PARÂMETROS CASO BCO COM 4 INTERVALOS. 168

1 INTRODUÇÃO

A produção do petróleo é atualmente de extrema importância para a população mundial, a qual, muito provavelmente, continuará dependente de sua utilização não só como fonte de energia, mas também como matéria prima de vários produtos utilizados no nosso cotidiano.

A indústria do petróleo demanda resultados rápidos e economicamente viáveis para seu gerenciamento. Para isso, necessita realizar o planejamento da produção dos campos de petróleo, assim como o acompanhamento, através de decisões rápidas, com base em dados confiáveis, para que a produção alcance sua maior eficiência com o menor desperdício de material, tempo e insumos.

Para atingir esse objetivo, faz-se necessário o gerenciamento dos reservatórios de petróleo e o desenvolvimento e aprimoramento dos métodos de modelagem e simulação dos processos do fluxo dos fluidos nos mesmos. O desafio é obter um modelo que represente da forma mais realista possível a física do reservatório, através de modelos computacionais e equações matemáticas, que possibilite, ao mesmo tempo, prever seu comportamento ao longo do tempo e alcançar a melhor estratégia de gerenciamento da sua produção e também atender as pressões da indústria por respostas rápidas e, em geral, com recurso disponível limitado.

1.1 MOTIVAÇÃO

Os simuladores de reservatórios tradicionais demandam detalhados balanços de massa, elevado custo computacional, envolvendo em geral malhas discretizadas com milhões de células.

A modelagem se torna bastante complicada, pois, além da complexidade do fenômeno físico do fluxo dos fluidos que ocorre nos reservatórios, existe também a dificuldade da determinação dos parâmetros geológicos ao longo do reservatório, como: compressibilidade, permeabilidade, porosidade, entre outros. Poucas propriedades do reservatório são diretamente medidas, muitas precisam ser inferidas e em geral envolvem ensaios e procedimentos caros para serem determinadas. Tudo isso pode resultar em modelos complexos, com grandes incertezas e alto custo.

Outro fator que deve ser observado é o tempo para tomadas de decisão. Uma grande quantidade de dados devem ser analisados e interpretados para serem incorporados no modelo do reservatório, e muitas vezes a indústria é pressionada a tomar decisões rápidas baseada em recursos limitados (Holanda, 2015).

Portanto, simplificar os modelos para simulação dos reservatórios tem sido um desafio. As técnicas desenvolvidas variam entre modelos simples a complexas aproximações numéricas. O que elas têm em comum, porém, é a análise dos dados do passado para encontrar resultados para o futuro, baseando-se em ajuste de dados histórico (Gentil, 2005).

Foi nesse contexto que Albertoni e Lake, (2003), iniciaram os estudos do modelo de capacitância e resistência (*Capacitance Resistance Model*, CRM) que é um modelo simplificado de reservatório que quantifica a conectividade entre poços injetores e produtores baseados no histórico das vazões de injeção e produção, os quais são tratados como dados de entrada e saída, respectivamente. O modelo considera efeitos de capacitância (compressibilidade) e resistividade (transmissibilidade) e foi escolhido o nome CRM devido à analogia a um circuito elétrico resistor-capacitor.

O modelo CRM é baseado em uma equação do balanço de massa, que considera através de seus parâmetros a compressibilidade e transmissibilidade do reservatório, e não requer um modelo geológico. Seus parâmetros, os quais são conectividade, constante de tempo e índice de produtividade, são determinados baseados no histórico das vazões de injeção, produção e a pressão de fundo de poço (*bottom hole presseure*, BHP), dos poços produtores, este último, se disponível.

A grande vantagem de ter como base do modelo esses dados é que são informações normalmente coletadas nos campos reais, são precisas e ainda encontram-se disponíveis em grande quantidade, portanto sua obtenção não gera custo.

Os parâmetros do modelo são determinados através de um problema de otimização, onde é minimizado o quadrado das diferenças entre as vazões de produção calculadas e observadas (dados de histórico reais de produção). Uma vez que os parâmetros do modelo são calculados, pode-se estimar a produção do reservatório, baseando-se no modelo com os parâmetros ajustados, resultando em um modelo de reservatório relativamente rápido e de baixo custo.

Ainda, o CRM é um modelo simplificado, de baixo custo computacional, e os valores dos seus parâmetros revelam importantes características geológicas do reservatório e do comportamento do fluxo dos fluidos no seu interior, sendo então bastante eficiente para tomadas de decisão rápidas, baseadas em dados reais e precisos.

O CRM vem sendo aprimorado para se aproximar e representar cada vez melhor, através de suas equações que governam a dinâmica do sistema, o real comportamento do fluxo dos fluidos no reservatório. Isso tem sido objeto de pesquisa de bastante relevância na modelagem e gerenciamento de reservatórios de petróleo.

O CRM clássico considera o reservatório como um modelo compactado em uma única camada. Os parâmetros são calculados para cada poço produtor, sendo únicos para cada um deles. Porém, como os reservatórios de petróleo são formados em rochas sedimentares, as quais são compostas de camadas heterogêneas, o fluxo dos fluidos tem diferentes comportamentos nas diferentes camadas do reservatório.

Como os parâmetros tem relação com as características geológicas do reservatório, se as camadas são heterogêneas, mas eles tem um valor único para todo o reservatório, é de se esperar que não representem, com fidelidade, o comportamento do fluxo dos fluidos em cada uma delas. Isso pode gerar desvios nos resultados obtidos pelo modelo do CRM clássico.

Um modelo CRM cujos parâmetros variem de acordo com as heterogeneidades das camadas do reservatório, representa então um aprimoramento para o CRM clássico. Para isso, seus cálculos devem ser realizados para cada camada do reservatório em que o poço produtor está completado, em vez de um parâmetro único para todo ele. Dessa forma, consegue-se modelar o reservatório aproximando-se mais de suas características reais.

Outro aspecto do CRM clássico é que os seus parâmetros são fixos para toda a simulação. Porém, em um campo real, os poços podem ser abertos e fechados durante o período de produção, ou mesmo pode ser realizada a conversão de um poço produtor para injetor. Esses procedimentos são realizados para melhorar a eficiência do varrido ou no caso do poço estar produzindo muita água, não sendo mais economicamente viável mantê-lo aberto. A conversão do poço, ou reaproveitamento, pode ser realizada quando o produtor alcança um alto corte de água prematuramente, então, ele é convertido em um novo injetor, melhorando a recuperação do óleo e aproveitando as instalações do poço já existente.

Se os parâmetros são fixos, esses eventos são ignorados na sua determinação, e, portanto, fazer seu cálculo de forma dinâmica ao longo da vida útil do reservatório também representa um aperfeiçoamento no modelo CRM. Isso torna os parâmetros mais próximos da realidade, pois os mesmos serão recalculados a medida que mudanças nas condições dos poços ocorram, levando em consideração a redistribuição de água entre os poços ativos em cada intervalo. Assim, os parâmetros conseguem descrever também com mais acurácia cada intervalo da produção, sendo calculados apenas para os poços que estão de fato ativos em cada intervalo.

1.1.1 Reservatórios de Petróleo

Os reservatórios naturais de petróleo consistem de rochas sedimentares com suficiente porosidade e permeabilidade para armazenar e transmitir fluidos. As rochas sedimentares são formadas a partir do depósito e acúmulo de partículas minerais ou orgânicas na superfície da terra, ou em bacias, e como consequência dessa deposição de material, é formada uma estrutura em camadas, com misturas de diferentes tipos de rocha com diferentes tamanhos de grãos e tipos de minerais.

São nessas formações heterogêneas que se formam os reservatórios de petróleo, e essas heterogeneidades são responsáveis pelo fluxo dos fluidos terem diferentes comportamentos nas diferentes camadas do reservatório, e por isso a importância desse estudo. Para a modelagem de uma rocha sedimentar, é necessária a capacidade de descrever a geometria e as características físicas de cada uma das suas camadas.

Toda rocha sedimentar consiste de uma matriz sólida com vazios interconectados, que são os poros. Os espaços porosos permitem que as rochas armazenem e transmitam os fluidos. A capacidade de armazenar é determinada pela fração de volume de poros (porosidade da rocha) e a capacidade de transmitir os fluidos (permeabilidade da rocha) é determinada pela interconexão dos poros.

As formações rochosas encontradas nos reservatórios de petróleo são tipicamente heterogêneas. Na escala de grãos individuais, pode haver grande variação nos tamanhos de grãos, proporcionando ampla distribuição de volumes vazios e interconexões, que podem formar canais.

Fraturas e falhas, por outro lado, são criadas por tensões na rocha e podem ser prolongadas de alguns centímetros até centenas de metros. As falhas podem ter uma capacidade significativamente maior ou menor de transmitir fluidos do que as rochas ao seu redor, dependendo de como o espaço vazio for preenchido (material de argila, por exemplo, torna a falha impermeável).

Observa-se também que as camadas formadas são separadas por outras finas camadas com permeabilidade substancialmente menor, por isso, neste trabalho, faz-se a consideração das camadas do reservatório serem isoladas entre si, não havendo troca de fluxo entre elas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é:

Implementar métodos baseados em modelos de Capacitância e Resistência em reservatórios de múltiplas camadas, isoladas entre si, e com tempo de produção que envolva eventos de abertura e/ou fechamento de poços ou conversão de poços produtores em injetores.

Os objetivos específicos são:

- Analisar a mudança das conectividades entre os pares de poços injetores e produtores quando ocorrem eventos de abertura e fechamento de poços em um reservatório;
- Calcular os parâmetros em situações em que o BHP não é conhecido e avaliar o impacto da não utilização desse parâmetro nos resultados.
- Calcular a vazão inicial dos poços produtores como parâmetro do modelo CRM, caso esse dado não seja conhecido.
- Calcular os parâmetros de um modelo CRMP-D (CRM baseado nos produtores calculado de forma dinâmica), quando há conversão de um poço produtor em injetor, avaliar os resultados e impactos deste evento nos parâmetros do modelo;

1.3 METODOLOGIA

Nesse estudo foram implementados métodos baseados no modelo de Capacitância e Resistencia em reservatórios com múltiplas camadas e com tempo da produção envolvendo

eventos de abertura, fechamento e conversão de poços. Para isso os parâmetros do modelo são determinados por camada do reservatório e de forma dinâmica, variando com a evolução da produção do reservatório.

Os modelos implementados foram:

- CRM com múltiplas camadas e parâmetros dinâmicos (*Multi-Layer*, CRM-ML);
- CRM com múltiplas camadas e múltiplas respostas da constante de tempo e parâmetros dinâmicos (*Multi-Layer Multi-Response Time Constant*, CRM-MLMTC);
- CRM em uma única camada e parâmetros dinâmicos (*producer based dynamic*, CRMP-D).

O CRM é um modelo simplificado de reservatórios que quantifica a comunicação de pares de poços produtores e injetores. É desenvolvido a partir da equação do balanço material e não requer um modelo geológico, ele se baseia nas informações das vazões de injeção e produção e variação do BHP dos poços produtores. O modelo considera três parâmetros para a modelagem do reservatório: Conectividades entre um par de poços injetor i e produtor j (λ_{ij}), Constante de Tempo (τ_j) e Índice de Produtividade (J_j).

O CRM-ML é a forma mais simples de implementação do CRM por camada, pois, dividindo-se um reservatório em um número α de camadas, ele introduz as conectividades do poço por camada, λ_{ij}^{α} as quais irão substituir a conectividade única do poço λ_{ij}. Porém, mantem uniformes por produtor (e não por camadas) as constantes de tempo, τ_j, e o índice de produtividade, J_j. No CRM-MLMTC todos os parâmetros são calculados por camada. Quanto a evolução no tempo, em ambos os modelos todos os parâmetros passam a ser dinâmicos.

As informações necessárias para determinar os parâmetros do modelo, que são o histórico das vazões de injeção e de produção observadas, e BHP dos poços produtores, podem ser obtidas em um campo real, e geralmente existem disponíveis em grandes quantidades, pois são normalmente coletadas. Para fins de pesquisa, as vazões de produção observadas podem ser obtidas através de simulação.

No simulador de reservatórios, o qual atua como um sistema de processamento de sinais, informações aleatórias das vazões de injeção e mudanças de BHP nos produtores são processadas, sendo estes os dados de entrada, que podem ser manipulados, para controlar a vazão de produção, que é a resposta do reservatório ou sinal de saída. Para esse trabalho, as vazões de produção observadas foram obtidas através do simulador comercial IMEX (CMG, 2016).

Para os modelos CRM-ML e CRM-MLMTC, é necessário conhecer as vazões de injeção e produção por camada, e para isso os poços que compõe os modelos estudados foram simulados como poços inteligentes. Nesses poços, cada camada em que o poço é completado é controlada por uma válvula, permitindo conhecer as vazões de injeção e produção em cada uma delas.

Os parâmetros do modelo são estimados resolvendo o problema de mínimos quadrados restritos, onde minimizamos a função objetivo, a qual é a soma dos quadrados dos desvios entre as vazões reais observadas no campo, ou obtidas por simulação, e as vazões calculadas através da função desenvolvida.

Neste problema de otimização, a função objetivo tem como restrição que a soma das conectividades em cada injetor, i, tem que ser menor ou igual a um, para manter a conservação da massa, e os parâmetros tem restrições de limites.

Neste estudo, o cálculo dos parâmetros foi realizado decorrendo os seguintes passos:

1. Informar dados aleatórios, dentro de um intervalo determinado, de BHP dos poços produtores e vazões de injeção, para o simulador, para obter resultados das vazões nos produtores. Esses dados são alterados a cada 30 dias durante a simulação e os resultados foram obtidos por dia. Para que tenhamos uma boa representação das condições do reservatório, é necessário que o intervalo determinado para a variação dos dados de entrada cubra a variação natural de operação do sistema. Dividir os dados de produção dos poços e as respostas obtidas das vazões de produção em intervalos de tempo, de acordo com fechamento e/ou abertura e conversão de poços produtores, eventos esses que alteram o número de poços ativos no reservatório. O número de intervalos será o número de vezes que houver tais eventos, mais um.

2. Para cada intervalo de tempo, utilizando os dados correspondentes daquele intervalo, calcular os parâmetros através de otimização. Para resolver o problema de otimização foi utilizada a estratégia de Weber, (2009), que resolve dois problemas: um onde não é imposta a restrição do problema (problema desacoplado) e outro, onde todas as restrições são consideradas (problema acoplado). A função objetivo da otimização minimiza a diferença entre as vazões calculada e observada nos poços produtores *j*, porém, tem como restrição, o somatório das conectividades em cada poço injetor *i*. Portanto, a aplicação da restrição da soma das conectividades igual a 1 em cada injetor não permite minimizar os termos da função objetivo correspondente a cada produtor *j* separadamente, porque os resultados obtidos podem não atender, ao final, a essa restrição. Porém, se essa restrição for desconsiderada, os parâmetros de cada poço produtor podem ser encontrados independentemente (problema desacoplado) e serem posteriormente utilizados como ponto de partida para o problema acoplado, que é um problema mais complexo devido à restrição.
   2.1. **Problema desacoplado**: partindo de um ponto inicial, utilizar o problema desacoplado para minimizar a função objetivo, para cada poço produtor $j = 1 \cdots N_P$. O resultado do problema desacoplado é utilizado como ponto de partida para a resolução do problema acoplado.
      2.1.1. Para resolver o problema desacoplado, utiliza-se a técnica de mínimos quadrados (*Least Squares)*. A otimização foi feita utilizando a função *lsqnonlin*, do optimization toolbox do MATLAB, a qual resolve problemas de mínimos quadrados não linear com restrições de limites. O problema dos mínimos quadrados é utilizado em muitas áreas de aplicação, e é uma ferramenta robusta para otimização. A grande vantagem desse método é que, devido a sua estrutura, a matriz hessiana é obtida a partir de derivadas apenas de primeira ordem, o que o torna mais fácil de resolver do que os problemas gerais de minimização. Além disso, ele fornece um bom ponto de partida para o problema acoplado, diminuindo o número de iterações do mesmo.
3. Filtro: se a solução do problema acoplado violar a restrição do problema, utilizar o filtro para ter como ponto de partida do problema acoplado uma solução viável.

4. Utilizando os resultados do problema desacoplado filtrado como ponto de partida, resolver o problema acoplado para cálculo final dos parâmetros.
   4.1. **Problema acoplado**: é resolvido utilizando a função *fmincon* do optimizations toolbox do MATLAB, solver *SQP*. Tanto no problema acoplado como no problema desacoplado, o gradiente é calculado por diferenças finitas.
5. Como resultado final do problema, teremos diferentes conjuntos de parâmetros para cada intervalo de tempo da simulação. Caso a simulação tenha apenas um intervalo de tempo, teremos um único resultado para os parâmetros.

Finalizados esses passos e determinados os parâmetros, seus valores devem ser analisados para avaliar a coerência dos resultados obtidos para os mesmos. Os parâmetros devem apresentar relação direta com as heterogeneidades apresentadas nos modelos estudados, por exemplo, se existir uma falha selante entre um par de poços injetor/produtor, a conectividade deve ser nula, enquanto que se existir um canal de alta permeabilidade, deve haver uma alta conectividade entre os poços.

A avaliação do desempenho do modelo é também avaliada através do ajuste entre as curvas das vazões de produção calculadas e observadas, sendo as vazões calculadas obtidas substituindo-se na equação de cálculo da vazão de produção do modelo os dados de histórico da vazão de injeção e BHP (utilizados para determinar os parâmetros) e os parâmetros determinados na otimização. Um bom ajuste entre as curvas mostra um bom desempenho do modelo de se aproximar do comportamento real do reservatório e reflete a capacidade dos parâmetros determinados de capturar com eficácia as características geológicas do reservatório e o comportamento do fluxo dos fluidos ao longo da simulação.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2, é realizada a revisão bibliográfica dos modelos CRM, mostrando suas equações matemáticas desde a sua primeira abordagem, e a sua evolução através de autores que buscam explicar fisicamente o modelo e implementá-lo, introduzindo às equações elementos que representem cada vez melhor as características de um reservatório real. São apresentados os parâmetros do modelo e seus significados físicos.

No capítulo 3 é introduzida a idéia da resolução do CRM para um reservatório de múltiplas camadas e de forma dinâmica. São desenvolvidas as equações dos modelos CRM-ML e CRM-MLMTC e é feita uma explicação da importância do cálculo dos parâmetros de forma dinâmica, e como deve ser realizado.

No capítulo 4 é mostrado o procedimento para determinação dos parâmetros do CRM, através de um problema de otimização. São descritas as variáveis e restrições do problema e também a estratégia para sua resolução. É realizada uma explanação sobre mínimos quadrados e Programação Quadrática Sucessiva (SQP), que são as técnicas utilizadas para o procedimento de otimização.

No capitulo 5 são mostrados os casos estudados. Os modelos são descritos e são descritas as simulações e os resultados obtidos para os parâmetros para diferentes situações. É realizada a discussão dos resultados a partir dos valores dos parâmetros obtidos e dos gráficos realizados.

No capítulo 6 apresentam-se as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros, baseadas em idéias que surgiram durante o desenvolvimento deste trabalho. Por fim estão as referencias utilizadas ao longo do desenvolvimento do trabalho e da dissertação.

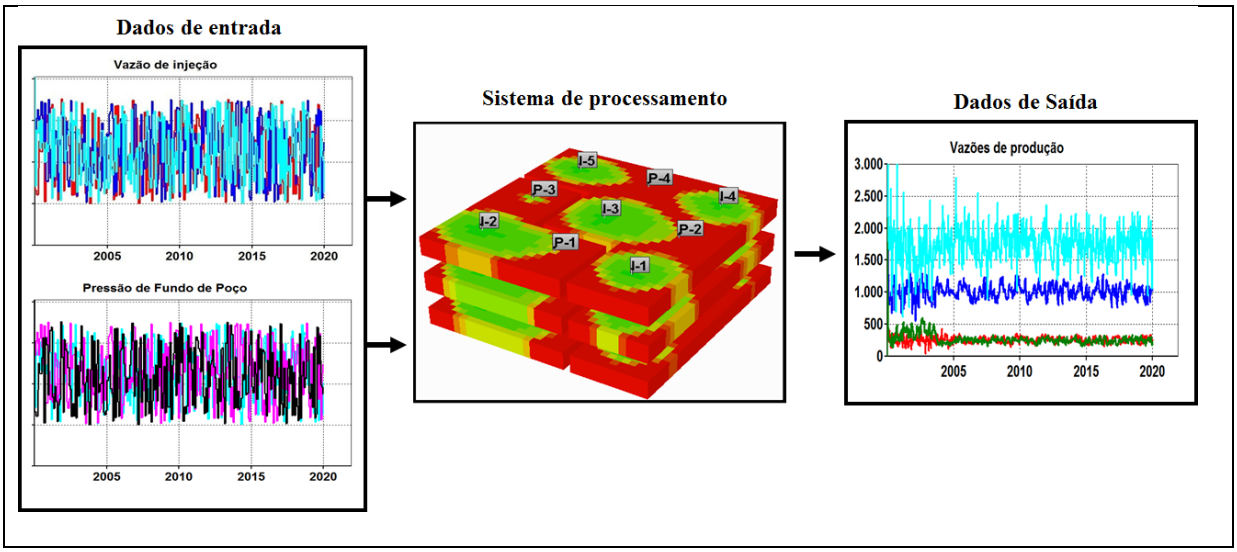
2 ESTUDO DO MODELO DE CAPACITÂNCIA E RESISTÊNCIA

Neste capitulo será introduzido o estudo do Modelo de Capacitância e Resistência (CRM), que é um modelo simplificado de reservatório que quantifica a conectividade entre poços injetores e produtores, baseado no histórico das vazões de injeção e produção, os quais são tratados como dados de entrada e saída, respectivamente, e o reservatório um sistema que processa dados.

Esses dados estão disponíveis de forma abundante nos campos e através deles podemos determinar os parâmetros do CRM, que são as conectividades, constante de tempo e índice de produtividade, sem que seja necessária a modelagem física do reservatório. Tais parâmetros refletem a dinâmica do fluxo dos fluidos nos reservatórios assim como os efeitos das heterogeneidades (canais e falhas) existentes no mesmo.

A Fig. 1 a seguir mostra um esquema de como as vazões de produção (sinal de saída) são influenciadas por mudanças na vazão de injeção e BHP (pressão de fundo de poço), que são os sinais de entrada processados no reservatório (sistema de processamento):

Figura 1 - Representação esquemática do impacto da vazão de injeção e BHP na vazão de produção de um reservatório arbitrário.



Fonte: A autora

A seguir, será realizada a revisão bibliográfica e serão desenvolvidas as formulações matemáticas do modelo.

2.1 EVOLUÇÃO DO CRM

Uma primeira abordagem do CRM foi introduzida por Albertoni e Lake, (2003) que partiram da hipótese de que o comportamento de um reservatório pode ser inferido apenas pela análise dos seus dados de histórico de injeção e produção. Desenvolveram uma técnica de análise de regressão linear multivariada com filtros que determina quantitativamente a comunicação entre pares de poços produtores e injetores além de prover informações sobre a permeabilidade e possíveis barreiras existentes no reservatório, o qual foi considerado como um sistema que processa estímulos (injeção) e retorna com respostas (produção).

Dois modelos foram propostos: regressão linear multivariada (*Multivariate linear regression*, MLR) e regressão linear multivariada balanceada (*Balanced Multivariate linear regression*, BMLR). O uso do modelo irá depender do tipo do fluxo e dos dados que estão sendo analisados.

Regressão linear multivariada: esse modelo é utilizado quando existe diferença significativa entre a vazão de injeção e de produção no campo, e a vazão de produção do produtor q_j é dada pela combinação linear da vazão dos injetores I_i mais uma constante λ_{0j} que representa a falta de equilíbrio do sistema:

$$q_j(t) = \lambda_{0j} + \sum_{i=1}^{N_I} \lambda_{ij} I_i(t), \qquad (j = 1 \ldots N_p) \tag{2.1}$$

onde N_p é o número total de produtores e N_I é o número de injetores. Os fatores λ_{ij} são os fatores que representam os pesos de cada poço injetor em relação a cada poço produtor. Se as vazões de injeção são conhecidas, os fatores λ_{0j} e λ_{ij} podem ser determinados atavés da solução de um problema de regressão linear multivariada, onde é minimizada a variância (var) entre as vazões de produção observada $q^{j,obs}$ e calculada $q^{j,\mathrm{cal}}$:

$$\text{Minimize} \quad \text{var}(q^{j,obs} - q^{j,cal}) \tag{2.2}$$

Regressão linear multivariada balanceada: é utilizada se o fluxo é balanceado, ou seja, a vazão de injeção é aproximadamente igual a vazão de produção. Neste modelo a constante λ_{0j} é nula e a equação mostra que a vazão de produção do produtor j é uma

combinação linear das vazões de injeção de cada injetor, onde os λ_{ij} são, da mesma forma, os fatores de peso para cada injetor em relação ao produtor.

$$q_j(t) = \sum_{i=1}^{N_I} \lambda_{ij} I_i(t), \qquad (j = 1 \ldots N_p),\ (\mathrm{i} = 1 \ldots N_I) \tag{2.3}$$

Nesse caso, a determinação dos coeficientes também é realizada através da solução de um problema de regressão linear multivariada, onde é minimizada a variância (var) entre as vazões de produção observada $q^{j,obs}$, calculada $q^{j,\mathrm{cal}}$, como mostra a equação (2.3).

Os coeficientes dependem apenas da posição relativa entre os poços e das propriedades do reservatório.

Albertoni e Lake, (2003), também utilizaram filtros difusivos para considerar o tempo de atraso e atenuação das mudanças que ocorrem entre o estímulo (injeção) e a resposta (produção). Os filtros se tornam importantes quando existem grandes distâncias entre injetores e produtores e para meios com grande dissipação do fluido.

A dissipação é definida como o inverso da difusividade. Baixas permeabilidades, grande porosidade e uma compressibilidade total alta, contribuem para uma grande dissipação. Se não houver dissipação no reservatório, e dependendo da distância entre os poços produtor e injetor, uma mudança na vazão de injeção causa uma mudança equivalente e instantânea na vazão de produção.

Os filtros são aplicados às vazões de injeção e basicamente transformam essas vazões de forma que quando influenciarem a vazão de um determinado produtor a resposta deste último será equivalente a de um meio incompressível, ou seja, o efeito da dissipação será anulado.

Para a utilização dessa metodologia, os autores consideraram algumas hipóteses, como:

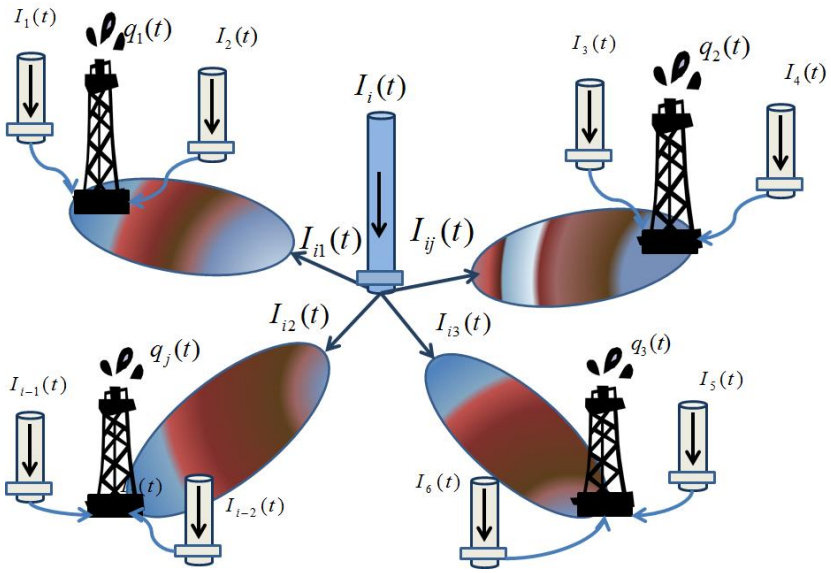
- O reservatório é homogêneo;
- A hipótese geral é que durante o período selecionado para análise, exceto as vazões de injeção e produção, todos os parâmetros do campo devem permanecer constantes.

- Não pode haver mudança na quantidade de poços durante o tempo analisado;
- A pressão de fundo de poço (BHP) deve ser constante – mudanças no BHP causam mudanças na pressão ao redor do poço, e a técnica assume que toda mudança na vazão de produção é devida exclusivamente a mudanças na vazão de injeção.
- A razão de óleo – gás deve ser constante, para não causar mudanças na compressibilidade e consequentemente na difusividade do reservatório.
- Não pode haver inclusão de camadas no reservatório.
- A vazão da depleção primaria é assumida como constante;

Nesse modelo proposto, porém, não foi feita a relação entre os coeficientes de peso e as características geológicas do reservatório, ou seja, não se avaliou fisicamente o que esses coeficientes poderiam representar.

Gentil, (2005), em continuação ao trabalho do Albertoni e Lake, (2003), interpretou o significado físico dos parâmetros da equação da vazão de produção. Seja um reservatório onde um injetor i está injetando uma vazão I_i e $j = 1 \ldots N_p$ produtores estão produzindo, cada um, uma vazão q_j, conectados entre si, a uma razão de contribuição λ_{ij} do injetor i em direção a cada produtor j como mostra a Fig. 2:

Figura 2 - Contribuição da vazão do injetor e também outros injetores do campo na vazão dos produtores.



Fonte: A autora

Considerando o sistema balanceado, a injeção total de um determinado injetor é igual a soma da contribuição do injetor para cada produtor:

$$I_i(t) = \sum_{j=1}^{N_P} I_{ij}(t) \tag{2.4}$$

Considerando também que há contribuição de outros possíveis injetores presentes no campo, a vazão no produtor j é dada pela equação a seguir:

$$q_j(t) = \sum_{i=1}^{N_I} I_{ij}(t) \tag{2.5}$$

Analisando as equações (2.3) e (2.5), os dois sistemas serão o mesmo se:

$$I_{ij}(t) = \lambda_{ij} I_i(t) \tag{2.6}$$

Combinando as equações (2.4) e (2.6), temos:

$$I_i(t) = \sum_j \lambda_{ij} I_i(t) \quad \text{ou} \quad \sum_j \lambda_{ij} = 1 \tag{2.7}$$

O que nos leva a interpretação física do parâmetro:

$$\lambda_{ij} = \frac{I_{ij}}{I_i} \tag{2.8}$$

Portanto Gentil, (2005) mostrou que o λ_{ij}, posto como um parâmetro de peso na equação do Albertoni e Lake, (2003), representa a razão da vazão de contribuição entre um par de poços injetor (i_i) e um produtor (q_j) para a vazão total injetada por esse injetor, e interpretou o seu significado físico como uma função diretamente proporcional a transmissibilidade e inversamente proporcional a distância entre os poços. Esse fator passou a ser chamado de conectividade.

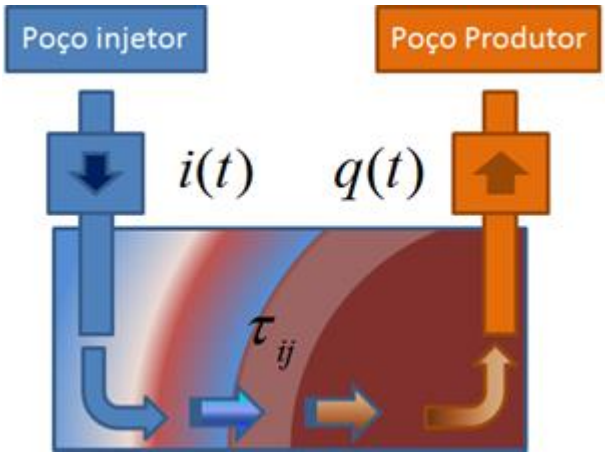
Yousef et al., (2006) demonstrou a capacidade de extrair propriedades geológicas do reservatório através dos dados de histórico de injeção e produção, introduzindo ao modelo de Capacitância (Capacitance Model, CM) ou CRM, um parâmetro chamado constante de tempo, o qual substituiu os filtros de difusividade utilizados por Albertoni e Lake, (2003).

O CRM considera os efeitos da compressibilidade, volume poroso e índice de produtividade, através de uma regressão não linear multivariada, incluindo nas equações do modelo o parâmetro constante de tempo para caracterizar a diferença do tempo do sinal de injeção e seu efeito na vazão no produtor. Dessa forma, nesse modelo, as conectividades e as constantes de tempo representam propriedades do reservatório entre um par de poços produtor e injetor.

O modelo de capacitância e resistência parte do balanço de massa total no reservatório:

Figura 3 - balanço material do reservatório.

Volume acumulado = vazão entrada – vazão de saída



Fonte: A autora

A equação diferencial que governa o balanço material em um reservatório com um injetor i e um produtor j é dada a seguir:

$$c_t v_p \frac{\overline{dp^j}}{dt} = I(t) - q(t) \tag{2.9}$$

Onde c_t =compressibilidade total, considerada constante, v_p = volume poroso (poros conectados), dp^j = pressão média do volume drenado pelo produtor, $I(t)$ =vazão de injeção no tempo *t* e $q(t)$ = vazão total líquida do produtor no tempo *t*.

Como em um campo real existem vários produtores e injetores funcionando simultaneamente, a vazão de produção total em um produtor é em geral resultado da injeção de vários poços injetores. O balanço mostrado na equação (2.9) precisa então ser generalizado para um produtor e multiplos injetores. Como um injetor pode ser compartilhado por mais de um produtor, introduzimos a equação a conectividade λ_{ij} para representar a fração de água injetada no injetor i que contribui na vazão de produção do produtor j. Temos então:

$$c_t v_p \frac{\overline{dp^j}}{dt} = \sum_{i=1}^{N_I} \lambda_{ij} I_i(t) - q^j(t) \tag{2.10}$$

Onde: dp^j = pressão média do volume drenado pelo produtor, j, N_I = número de injetores $I_i(t)$ =vazão de injeção do injetor (i) no tempo (t) e $q^j(t)$ = vazão total líquida do produtor j no tempo t.

Para termos uma expressão relacionando apenas as vazões, um índice de produtividade (J_j) foi introduzido:

$$q^j(t) = J_j(\overline{p^j(t)} - p^j_{wf}) \tag{2.11}$$

Onde J_j =índice de produtividade do produtor j e p^j_{wf} = pressão de fundo de poço (BHP) no produtor j. Eliminando a pressão média do reservatório $\overline{p^j(t)}$ nas Eq.(2.10) e (2.11), obtemos a equação de continuidade para o produtor (j) apenas como função das vazões:

$$\tau_j \frac{dq^j}{dt} + q^j(t) = \sum_{i=1}^{N_I} \lambda_{ij} I_i(t) - \tau_j J_j \frac{dp^j_{wf}}{dt} \tag{2.12}$$

Onde τ é o parâmetro da constante do tempo do volume drenado, e é definido como:

$$\tau = \frac{c_t v_p}{J} \tag{2.13}$$

No seu modelo, Youssef et al., (2006) considera uma conectividade e uma constante do tempo para cada par produtor/injetor, para que os diferentes graus de atenuação da mudança de pressão de um injetor no produtor sejam capturados. Também os índices de produtividade (J_{ij}) são determinados para cada par injetor/produtor.

A solução apresentada por Youssef et al., (2006) para a equação diferencial (2.13), que representa para o CRM a forma geral da vazão de produção de um produtor j influenciado por N_i injetores, está a seguir:

$$q^j(t) = \lambda_p q^j(t_0) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}} + \sum \lambda_{ij} \left[e^{\frac{-t}{\tau_{ij}}} \int_{\xi=t_0}^{\xi=t} \frac{1}{\tau} e^{\frac{\xi}{\tau_{ij}}} i_{ij}(\xi) d\xi \right] +$$
$$+\nu_j \left[p_{wf_j}(t_0) e^{-\frac{\Delta t}{\tau_j}} - p_{wf_j}(t) + \frac{e^{\frac{-t}{\tau_j}}}{\tau_j} \int_{\xi=t_0}^{\xi=t} e^{\frac{\xi}{\tau_j}} p_{wf_j}(\xi) d\xi \right] \tag{2.14}$$

Onde λ_p e τ_p são conectividade e constante do tempo para contribuição da produção primária, $q^j(t_0)$ é a vazão total inicial do produtor, λ_{ij} é a conectividade entre o injetor i e o produtor j, τ_{ij} é a constante de tempo para o meio entre injetor i e o produtor j, ξ é uma variável de integração e ν_j é um coeficiente que determina o efeito da mudança do BHP no produtor j, sendo aproximado por:

$$\nu_j = \sum_{i=1}^{N_I} J_{ij} \tag{2.15}$$

Youssef et al., (2006) então definiu fisicamente os parâmetros do modelo:

- *Conectividades* λ_{ij}: representa a fração da vazão de injeção do injetor *i* contribuindo na vazão de produção do produtor *j*. É propriedade da geologia assim como da posição entre poços e independe das vazões de injeção e produção.
- *Constante de tempo* τ: A constante do tempo relaciona o tempo necessário para uma variação de pressão, causada por uma variação na vazão de injeção, influenciar a vazão produção.
- *Índice de produtividade J*: depende das propriedades da rocha (permeabilidade), do fluido e da geometria do poço (área transversal).

Liang et al., (2007) usou integração numérica para avaliar as integrais da vazão de injeção, porém negligenciando a variação do BHP do produtor.

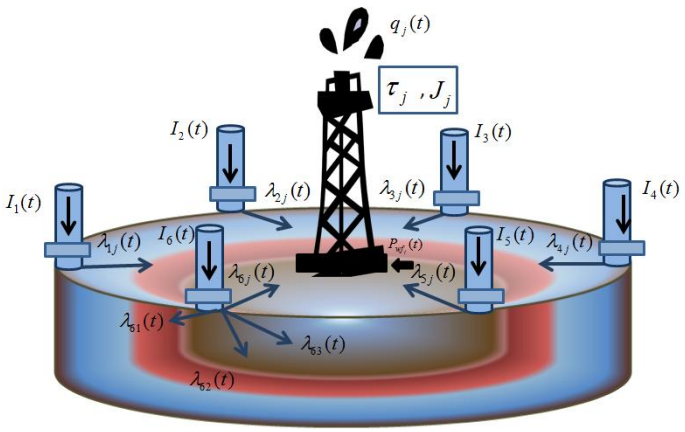
Sayapour, (2008) introduziu soluções analíticas para a equação diferencial da continuidade do modelo de capacitância (2.12), baseado na superposição do tempo e apresentou soluções para três diferentes volumes de controle do reservatório:

1) Volume drenado de todo o reservatório, utilizando a representação do reservatório como um tanque, um pseudo produtor representando todos os produtores e um pseudo injetor representando todos injetores, CRMT.
2) Volume drenado de cada produtor, CRMP.
3) Volume drenado entre cada par injetor/produtor, CRMIP.

Na presente dissertação o volume de controle utilizado foi baseado no produtor, ou seja, o CRMP, pois é importante analisar os parâmetros dos poços separadamente, invés de considerar um par de pseudo produtor/injetor.

O CRMP divide o reservatório em volumes de controle baseados em cada produtor e todos os injetores que influenciam na sua vazão de produção, como pode ser observado na Fig. 4. Considera como parâmetros do modelo uma conectividade (λ_{ij}) para cada par de injetor (i) e produtor (j) e uma constante do tempo (τ_j), assim como um índice de produtividade (J_j), para cada produtor.

Figura 4 - Representação das conectividades dos injetores para o produtor j.



Fonte: A autora

Integrando a equação diferencial (2.12) para o volume de controle baseado no produtor, para um discreto intervalo de tempo Δt, durante o qual as vazões de injeção de todos os injetores são assumidas constantes e também os parâmetros permanecem constantes, temos como solução analítica da vazão de produção no passo de tempo *k* (Sayapour, 2008):

$$q_k^j = q_{k-1}^j e^{-\frac{\Delta t}{\tau_j}} + \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_j}}\right) \sum_{i=1}^{N_I} \lambda_{ij} I_{ik} - \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_j}}\right) \tau_j J_j \frac{p_{wf}^{j(k)} - p_{wf}^{j(k-1)}}{\Delta t} \quad (2.16)$$

A equação (2.16) mostra que a vazão de produção é o resultado da soma dos efeitos dos três termos a direita, sendo:

- O primeiro termo: a resposta inicial da vazão de produção associada com a produção primária, ou seja, a vazão em $t = t_0$;
- O segundo termo é a influência das vazões de injeção;
- O terceiro termo é o efeito da mudança de BHP dos produtores, e caso não se tenha esse dado disponível, esse último termo fica nulo.

O CRMP apresenta bons resultados quando as propriedades do reservatório são em sua maioria homogêneas ao redor do produtor, porque considera apenas uma constante do tempo e um índice de produtividade para todo o produtor.

Weber et. Al., (2009) determinou os parâmetros do modelo de capacitância e resistência para grandes reservatórios, com uma grande quantidade de poços, utilizando regressão não linear. Para isso foi formulado um programa não linear (NPL), que tem como função objetivo o somatório do quadrado das diferenças entre as vazões de produção calculadas pelas equações do modelo CRM e as vazões observadas dos dados de histórico. Para resolvê-lo utilizou um sofisticado solver de regressão não linear, o CONOPT, que é um algoritmo de gradiente reduzido generalizado (GRG) desenvolvido por Drud, (1992).

Em posse dos parâmetros calculados, utilizou-os em um algoritmo de otimização que calcula vazões de injeção futuras que iriam maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) durante um determinado tempo de vida de um reservatório. Em seu trabalho, ele analisou desafios da utilização do CRM na sua aplicação a grandes reservatórios com uma grande quantidade de poços. Tais reservatórios, em geral, tem um longo período de produção, durante o qual as condições do reservatório podem ser modificadas, por exemplo, com a criação de novos poços, fechamento de poços existentes ou com a conversão de poços produtores para injetores. Além disso, uma grande quantidade de poços significa grande quantidade de parâmetros, então ele determinou um limite máximo de distância entre os poços acima da qual

as conectividades são consideradas nulas, diminuindo assim a quantidade de variáveis envolvidas no problema.

O modelo de capacitância e resistência é baseado no balanço material do fluido total, desconsiderando efeitos da mudança de saturação do mesmo. Para superar essa limitação do modelo, Cao et al (2014) propôs um modelo acoplado de CRM, baseado em fluxo bifásico incorporando ao modelo o balanço material do óleo.

Holanda, (2015) considerou o reservatório como um sistema que processa dados de entrada (vazão de injeção e BHP) produzindo sinais de saída (vazão de produção), sendo representado por equações de estado-espaço (SS).

Através de um sistema de equações lineares definiu a relação entre os dados de entrada, saída e estado do reservatório, descrevendo a completa dinâmica do sistema. Os parâmetros do CRM foram determinados utilizando um sistema de algoritmo caixa preta para calcular as vazões de produção, simulando o sistema com as equações de espaço-estado, ao invés de usar as equações diferenciais ordinárias (EDO) como em trabalhos anteriores. Essa nova formulação em termos de espaço-estado permitiu escrever o CRM em uma representação matricial, o que fornece mais informações sobre o comportamento do reservatório, é computacionalmente mais rápido e forncece uma estrutura que facilita sua implementação.

O CRM representado como um modelo de multi-saída/multi-entrada tornou-se mais simples de aplicar em campos com grande número de poços. No seu trabalho, Holanda também comparou o desempenho de três tipos de formulações de CRM: integrado (ICRM), baseado em produtor (CRMP), produtor de injetor-produtor (CRMIP). Além disso, a metodologia desenvolvida foi testada em três diferentes configurações de reservatório: 1) homogêneo com barreiras de fluxo; 2) canalizado; 3) ambiente shoreface. Holanda ainda testou a sensibilidade do modelo CRM em relação aos parâmetros conectividade e constante do tempo, concluindo que a função objetivo é bem mais sensível a mudanças nas conectividades do que na constante do tempo.

Todos esses estudos até aqui citados consideraram o reservatório sendo composto por uma única camada e os parâmetros constantes durante toda a simulação. Porém, como os reservatórios de petróleo são formados em rochas sedimentares as quais são compostas de

camadas heterogêneas, o fluxo dos fluidos tem diferentes comportamentos nas diferentes camadas do reservatório.

Jafroodi e Zhang, (2011) propuseram em seu trabalho que as conectividades e a constantes de tempo, assumidas constantes no CRM padrão desenvolvido nos trabalhos anteriores, devem ser dinâmicas, à medida que as características físicas do reservatório relacionadas com tais parâmetros, como a transmissibilidade, permeabilidade, porosidade, variam ao longo do tempo de produção do reservatório. Eles utilizaram ensemble Kalman fiters (EnKF), introduzido por Evensen, (2003), para capturar o comportamento dinâmico dos parâmetros.

Moreno, (2013) estudou o caso de um reservatório divido em três camadas incorporando ao modelo CRM a divisão do reservatório em múltiplas camadas, no qual os parâmetros são calculados para cada camada, e resolveu o sistema levando em consideração que as conectividades devem ser dinâmicas quando eventos de aberturas e fechamento de poços ocorrem durante o tempo de vida do reservatório.

Zhang et al., (2015) estudou um sistema com múltiplas camadas considerando as influências de diferentes condições geológicas para cada camada nos seus parâmetros, levando em consideração os efeitos do fluxo cruzado e da pressão de fundo de poço (*Bottom Hole Pressure* BHP).

O CRM continua sendo objeto de pesquisa de muitos autores, os quais vem desenvolendo diferentes soluções para as equaçãoes diferenciais do modelo original e para diferentes volumes de controle no reservatório, representando cada vez melhor, através das equações do modelo, a real a dinâmica do sistema.

Nesta dissertação, baseada no trabalho do Moreno, (2013), são implementadas 2 estratégias do CRM para o cálculo dos parâmetros de um reservatório que é divido em três camadas heterogêneas, isoladas entre si por camadas de permeabilidade nula.

As estratégias implementadas calculam os parâmetros por camada e são elas: CRM multi layer, CRM-ML e CRM multi layer multi response time constant, CRM-MLMTC. A diferença entre elas é que o CRM-ML calcula as conectividades por camada, mas os demais parâmetros, constante de tempo e índice de produtividade são únicos para o poço. Já o CRM-MLMTC calcula todos os parâmetros por camada.

Os resultados das estratégias implementada são comparados entre si e com os resultados do clássico CRM. Para isso, é realizado o ajuste das curvas entre as vazões calculadas através das equações de cada um dos modelos e das vazões observadas, para avaliar como se comporta o ajuste entre essas curvas para cada uma deles.

Observa-se que as camadas formadas nas rochas sedimentares são separadas por outras finas camadas com permeabilidade substancialmente menor, por isso a consideração das camadas serem isoladas entre si, não havendo troca de fluxo entre elas.

Além disso, os parâmetros são considerados dinâmicos com a evolução da simulação, considerando aberturas, fechamento e conversão de poços produtores. Isso significa que a cada passo de tempo da simulação em que há abertura ou fechamento de um ou mais poços produtores, as conectividades são recalculadas, levando em consideração a redistribuição da água injetada, e a sua influência, apenas entre os poços que estão produzindo naquele período, os quais são determinados como poços ativos.

Para o caso da conversão do poço é utilizada a terceira estratégia, o modelo CRMP-D, que é o clássico CRM, utilizando o volume de controle baseado no produtor (CRMP), porém calculando os parâmetros de forma dinâmica. São avaliados os resultados dos parâmetros do modelo, suas modificações devido à mudança do poço e ajuste entre as curvas das vazões líquidas de produção calculadas e observadas antes e após a conversão do poço.

Nesta dissertação, o cálculo dos parâmetros é realizado através de um problema de otimização que é resolvido em duas etapas: problema acoplado e desacoplado. Dessa forma, é resolvido inicialmente um problema mais simples (desacoplado) no qual a otimização é realizada por produtor, utilizando a técnica dos mínimos quadrados e gera um “warm start” para o problema acoplado, o qual realiza a otimização envolvendo todos os produtores simultaneamente, sendo portanto um problema mais complexo. A grande vantagem dessa estratégia é diminuir a quantidade de iterações deste último problema, que é resolvido através da técnica Programação Quadrática Sequencial *(sequential quadratic programming,* SQP*).*

3 RESERVATÓRIOS DE MÚLTIPLAS CAMADAS E PARÂMETROS DINÂMICOS

Nesta seção, baseado no trabalho do Moreno, (2013) será desenvolvido um modelo para o CRM no qual será incorporada a divisão do reservatório em múltiplas camadas genericamente chamadas de α. Os parâmetros serão calculados para cada camada do mesmo, e, além disso, deixarão de ser fixos, passando a ser dinâmicos durante o tempo de produção do reservatório de acordo com abertura e fechamento de poços e também no caso de conversão de poços.

Nos estudos anteriores do CRM o reservatório é considerado compactado em uma única camada. Logo, as heterogeneidades existentes entre suas camadas não são levadas em consideração, e, portanto, o diferente comportamento do fluxo dos fluidos nas diferentes camadas não tem como ser capturados pelos parâmetros, já que os mesmos são únicos para todo o poço.

Além disso, nesses estudos anteriores, os parâmetros do CRM são considerados fixos, ou seja, a redistribuição da água após um poço ser aberto ou fechado não é levada em consideração. Portanto, também as mudanças dos valores dos parâmetros, como consequência da mudança das condições de fluxo do reservatório, são desconsideradas, ocorrendo de um poço ser fechado em um determinado passo de tempo da produção, mas o modelo continuar incluindo o mesmo no cálculo dos parâmetros, atribuindo ao mesmo conectividades e índices de tempo que deveriam ser nulos.

O CRM tradicional passará a ser um caso particular desse modelo que será desenvolvido, no qual o reservatório tem uma única camada e não tem alterações de abertura e fechamento de poço durante todo o seu tempo produtivo.

Neste capítulo serão desenvolvidas as equações matemáticas considerando o reservatório dividido em múltiplas camadas, não conectadas entre si, utilizando para o balanço material o volume de controle baseado no produtor, CRMP aplicado a cada camada separadamente. Dois modelos serão apresentados: o CRM-ML e o CRML-MLMTC.

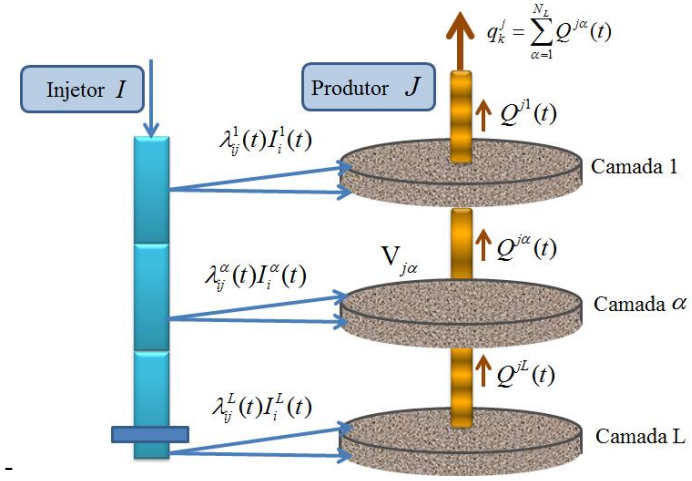
Ainda neste capítulo, será mostrada a estratégia para que os parâmetros sejam calculados de forma dinâmica, de acordo com eventos de abertura ou fechamento de poços ou mesmo conversão de produtores em injetores.

3.1 CRM MÚLTIPLAS CAMADAS MÚLTIPLAS CONSTANTES DO TEMPO (CRM-MLMTC)

Nesse modelo, será considerado um reservatório que pode ser subdividido em L camadas, isoladas entre si, genericamente chamadas de α, com poços injetores e produtores que podem se comunicar, a princípio, por qualquer uma dessas camadas.

Para aplicar o CRM a este problema, será utilizado o volume de controle baseado nos produtores, CRMP, porém, invés de fazer o balanço material para todo o reservatório como uma única camada, o balanço será realizado para cada camada do produtor j. O balanço material no volume de controle $V_{j\alpha}$, para cada camada α do produtor j está representado na Fig. 5. A contribuição do *i-ésimo* injetor para esse volume de controle é: $\lambda_{ij}^{\alpha}(t)I_i^{\alpha}(t)$.

Figura 5 - Balanço de massa do reservatório representado por camadas.



Fonte: A autora

Portanto, partindo da equação (2.12) do balanço material:

$$\tau_j \frac{dq^j}{dt} + q^j(t) = \sum_{i=1}^{Ni} \lambda_{ij} I_i(t) - \tau_j J_j \frac{dp_{wf}^j}{dt} \tag{2.12}$$

aplicada a uma camada α, teremos todos os parâmetros calculados por camada, ou seja, as conectividades, λ_{ij}^{α}, a constante de tempo, τ_j^{α}, e o índice de produtividade, J_j^{α}. Como todos os parâmetros estão em função da camada α, a vazão de produção do balanço de massa deste modelo será a vazão de produção na camada, $Q^{j\alpha}$ = vazão do produtor *j* na camada α:

$$\tau_j^{\alpha}\frac{dQ^{j\alpha}}{dt}+Q^{j\alpha}(t)=\sum_{i=1}^{N_I} f_{ij}^{\alpha}(t)i_{i\alpha}(t)-\tau_j^{\alpha}J_j^{\alpha}\frac{dp_{wf}^{j}}{dt} \tag{3.1}$$

A solução analítica é, portanto, obtida para a vazão de produção total da camada ($Q^{j\alpha}$):

$$Q_k^{j\alpha}(t)=Q_k^{j\alpha}(t-1)e^{-\frac{\Delta t}{\tau_j^{\alpha}}}+\left(1-e^{-\frac{\Delta t}{\tau_j^{\alpha}}}\right)\sum_{i=1}^{N_I}\lambda_{ijk}^{\alpha}(t)I_{ik}^{\alpha}-\left(1-e^{-\frac{\Delta t}{\tau_j^{\alpha}}}\right)\tau_j^{\alpha}J_j^{\alpha}\frac{p_{wf}^{j(k)}-p_{wf}^{j(k)}}{\Delta t} \tag{3.2}$$

Sendo $Q_k^{j\alpha}$ a vazão da camada α no instante de tempo k. A vazão total no produtor será obtida através da soma das contribuições das camadas:

$$q_k^{j}=\sum_{\alpha=1}^{N_I}Q_k^{j\alpha} \tag{3.3}$$

O CRM utiliza dados de histórico das vazões de injeção e produção através dos quais seus parâmetros são determinados. Em geral, na prática, esses dados são medidos para a vazão total do poço. A vazão de injeção ainda é mais comum ter a sua medição disponível por camada, mas para a vazão de produção, em geral, a medida disponível é a da vazão total do poço. Por isso, para determinar os parâmetros através do ajuste entre vazão calculada e observada, utiliza-se a diferença entre a soma das contribuições das vazões calculadas para cada camada e a vazão de produção total observada para o produtor.

Para resolver a equação analítica (3.2) são necessárias as vazões iniciais, no intervalo Δt e em cada camada. Caso não se tenha posse desse dado, ele passa a ser mais um parâmetro do modelo a ser determinado.

No CRM-ML e no CRM-MLMTC, os parâmetros, além de serem determinados por camada, são também dinâmicos. Portanto, no caso de haver abertura ou fechamento de todo o poço produtor, ou de uma de suas camadas, ou conversão do produtor para injetor, serão calculados um conjunto de parâmetros até o instante de tempo da mudança e a partir desse

tempo, até o final da simulação ou até que ocorra outra mudança nas condições dos poços, um novo conjunto de parâmetros é calculado para a nova situação de distribuição de água entre os produtores ativos (produtores que estão abertos) naquele intervalo.

3.2 CRM MÚLTIPLAS CAMADAS (CRM-ML)

Moreno, (2013) fez à consideração que o modelo CRM é bem mais sensível as variações do parâmetro das conectividades do que da constante de tempo, para fluxos considerados maduros, ou seja, fluxos nos quais todos os poços do reservatório já tenham atingido no mínimo 60% de corte de água.

Portanto, segundo ele, os cálculos por camada das conectividades tem um maior impacto nos resultados dos parâmetros que a constante de tempo. Levando isso em consideração, um modelo mais simples para reservatórios de múltiplas camadas pode ser então desenvolvido calculando-se as conectividades por camadas, λ_{ij}^{α}, porém, mantendo uniformes por produtor (e não por camadas) as constantes de tempo, τ_j, e o índice de produtividade, J_j. Logo $\tau_{j\alpha} = \tau_j$ e $J_{j\alpha} = J_j$. Assim, teremos um modelo que irá capturar heterogeneidades das camadas, porém com menos parâmetros a serem determinados.

Sendo τ_j e J_j únicos (constantes) para todo o poço produtor, ou seja, não estão em função da camada α, podemos utilizar a equação (3.1) para obter a equação de fluxo, substituindo $\tau_{j\alpha}$ por τ_j da mesma forma que $J_{j\alpha}$ por J_j, e a vazão de produção da equação será a vazão total do poço produtor, q^j:

$$\tau_j \frac{dq^j}{dt} + q^j(t) = \sum_{i=1}^{N_i} \lambda_{ij}^{\alpha}(t) i_i(t) - \tau_j J_j \frac{dp_{wf}^j}{dt} \quad . \tag{3.4}$$

Essa equação é bem parecida com a equação do CRM com uma única camada, mas o primeiro termo da direita contém o termo que caracteriza as heterogeneidades das camadas do reservatório, que é a soma das contribuições de todos os injetores em todas as camadas ($\lambda_{ij}^{\alpha}(t) i_i(t)$) associados à vazão de produção total do produtor j.

A seguinte solução analítica pode ser obtida para q_k^j (vazão total do produtor, j, no passo de tempo, k):

$$q_k^j = q_{k-1}^j(t-1)e^{-\frac{\Delta t}{\tau_j}} + \left(1-e^{-\frac{\Delta t}{\tau_j}}\right)\sum_{i=1}^{N_I}\lambda_{ijk}^{\alpha} I_{ik}^{\alpha} - \left(1-e^{-\frac{\Delta t}{\tau_j}}\right)\tau_j J_j \frac{p_{wf}^{j(k)} - p_{wf}^{j(k)}}{\Delta t} \tag{3.5}$$

Outra simplificação do CRM-ML, é que a equação analítica calcula a vazão total no produtor, que é o dado que temo-se na prática disponível nos campos, não sendo necessárias as vazões de produção por camada, que é um dado mais difícil de ser obtido.

Quanto a evolução no tempo, todos os parâmetros passam a ser dinâmicos. Portanto, o CRM-ML, mesmo que aplicado a um reservatório considerando uma única camada, ou seja, α=1, ainda é mais sofisticado que o CRM por ter a característica de ajustar as conectividades a novos valores quando um poço é aberto ou fechado, ou no caso de um novo poço ser aberto ou mesmo se houver uma conversão de poços.

Os parâmetros dinâmicos para o CRM-ML são calculados utilizando o mesmo critério do CRM-MLMTC.

3.3 MODELO DE CAPACITÂNCIA E RESISTÊNCIA DINÂMICO

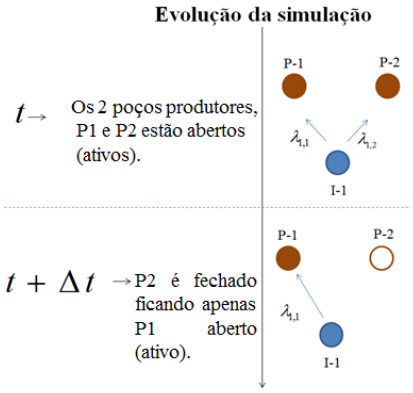
Durante um longo período de produção, como é o tempo de vida útil de um reservatório, é comum que poços sejam fechados, em sua totalidade ou alguma de suas completações, ou que sejam abertos novos poços ou mesmo que haja a conversão de poços produtores em injetores.

Essas mudanças tem como consequência uma redistribuição da água entre os poços do reservatório que continuam produzindo, e, portanto os parâmetros do CRM também irão sofrer modificação devendo ser recalculados.

A Fig. 6 ilustra esse fenômeno. No tempo *t* observamos que os dois poços produtores, P-1 e P-2, estão abertos, e, portanto estão ativos. No tempo $t+\Delta t$ o produtor P-2 é fechado, tornando-se inativo, e a água que era enviada para o mesmo pelo injetor I-1 passa a ser toda direcionada para o poço P-1, que continua ativo. Portanto, as conectividades no tempo *t* são:

$\lambda_{1,1}$, e $\lambda_{1,2}$. No tempo $t + \Delta t$, com o fechamento de P-2, $\lambda_{1,2}$ passa a ser nula, enquanto $\lambda_{1,1}$ é recalculada. Na Fig. 6, o tamanho das setas é proporcional ao valor das conectividades.

Figura 6 - Evolução das conectividades ao longo da simulação.



Fonte: A autora

Os parâmetros do CRM deixarão de ser fixos durante todo o intervalo de observação dos dados do reservatório, e passarão a ser dinâmicos, de acordo com as mudanças nas condições dos poços. Para isso os dados do intervalo total são divididos em intervalos de tempo: a cada evento de abertura e/ou fechamento de qualquer um dos poços produtores, os dados observados são truncados e um novo intervalo inicia.

Desta forma, cada intervalo de tempo será composto por um conjunto de dados de injeção/produção, e para esse conjunto de dados desse determinado intervalo de tempo é realizado o cálculo para determinação dos parâmetros relativos a esse intervalo. Quando é iniciado um novo intervalo de tempo, os dados do intervalo anterior são truncados e um novo conjunto de dados é iniciado para um novo cálculo dos parâmetros. Como consequência, os parâmetros são diferentes para cada intervalo, de acordo com os poços que estão produzindo naquele período, ou seja, os poços ativos.

Dessa forma, os parâmetros representam com muito mais veracidade as condições de fluxo no reservatório para cada intervalo de tempo.

Essa estratégia foi incorporada aos modelos CRM-ML e CRM-MLMT. Apesar do clássico CRMP considerar os parâmetros fixos, foi implementado também o modelo CRMP-D, que é o clássico CRMP, porém, calculando seus parâmetros de forma dinâmica.

4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

Diferente dos simuladores tradicionais de reservatórios, que requerem várias propriedades da rocha e do fluido para descrever o comportamento do fluxo dos fluidos no seu interior, o clássico CRM requer apenas a determinação de três tipos de parâmetros: as conectividades (λ_{ij}), as constantes de tempo (τ_j) e os índices de produtividade (J_j). A quantidade de parâmetros necessária para descrever o sistema é uma função do número de injetores, produtores e da formulação escolhida do CRM, certamente menos variáveis que qualquer modelo discretizado. Portanto, ao invés de partir de um modelo físico do reservatório, os parâmetros do CRM podem ser determinados apenas com base nos dados de produção reais de produção (vazão de injeção, produção e BHP).

Nesta sessão será mostrado o procedimento para determinação dos parâmetros do CRM, através de um problema de otimização. Pode-se observar que o modelo CRM-MLMTC, apresentado na sessão anterior, pode ser considerado o modelo geral para o CRM, sendo o CRM-ML um caso simplificado, onde as conectividades são calculadas por camada λ_{ij}^{α}, porém, as constantes de tempo, τ_j, e o índice de produtividade, J_j são únicas para o poço, $\tau_{j\alpha} = \tau_j$ e $J_{j\alpha} = J_j$ e o CRMP seria o caso particular onde α =1, ou seja, um reservatório com apenas uma camada, logo todos os parâmetros são únicos para o poço.

Nesse capítulo serão também abordadas as características necessárias dos dados de entrada para determinação dos parâmetros, as características dos parâmetros e suas restrições para o problema de otimização e a estratégia utilizada para resolver o problema de otimização O problema é dividido em dois, desacoplado e acoplado, com o objetivo de diminuir o número de iterações necessárias para o cálculo dos parâmetros do modelo.

4.1 PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Mesmo sendo conhecido o significado físico dos parâmetros do CRM, as propriedades físicas necessárias para determinar seus valores (por exemplo, a transmissibilidade e porosidade) não podem ser diretamente medidas, nem determinadas com precisão através de ensaios de laboratório. A grande vantagem deste modelo é que os seus parâmetros serão determinados sem precisar estimar essas propriedades físicas. Eles serão

determinados computacionalmente a partir da análise da resposta do reservatório (vazão de produção) aos estímulos dos sinais de entrada (vazão de injeção e BHP).

Em posse dos dados de histórico do reservatório de injeção e BHP, e a partir da equação analítica (3.2), do modelo CRM-MLMTC, que governa a dinâmica do sistema, podemos calcular as vazões de produção nos poços produtores:

Tendo, também como dado de histórico, as vazões de produção reais do reservatório (vazões observadas), os parâmetros são as variáveis do problema de otimização (λ_{ij}^{α}, τ_j^{α}, J_j^{α}, $j = 1 \cdots N_P$, $\alpha = 1 \cdots N_l$) e podem ser estimados resolvendo o problema de mínimos quadrados restritos, onde minimizamos a função objetivo, a qual é a soma do quadrado das diferenças entre a vazão real observada no campo, ou obtida por simulação, e a vazão calculada através da função desenvolvida.

O problema de otimização posto a seguir pode ser considerado como um problema geral das estratégias CRM apresentadas nesse trabalho, podendo ser particularizado para cada modelo de acordo com o número de camadas do reservatório e com os parâmetros que são função da camada ou constantes para todo o poço produtor:

$$\text{Minimize} \sum_{k=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_P} \left(q_k^{j,obs} - q_k^{j,cal} \right)^2 \quad \text{com} \quad q_k^{j,cal} = \sum_{\alpha=1}^{N_L} Q_{\alpha}^{j}$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeito a:} \quad & \sum_{i=1}^{N_P} \lambda_{ij}^{\alpha} \leq 1, && \text{para todo } i, \alpha \\ & 0 \leq \lambda_{ij}^{\alpha} \leq 1, && \text{para todo } i,\ \alpha \\ & \tau_{mín} \leq \tau_j^{\alpha} \leq \tau_{máx}, && \text{para todo } j,\ \alpha \\ & J_{mín} \leq J_j^{\alpha} \leq J_{máx}, && \text{para todo } j,\ \alpha \end{aligned} \qquad (4.1)$$

Onde, $q_k^{j,cal}$ = vazão total calculada do produtor *j* no passo de tempo *k*, $q_k^{j,obs}$ = vazão total observada em dados de histórico do produtor *j* no passo de tempo *k*, Q_j^{α} = vazão do produtor *j* na camada α. N_t, N_p e N_l número de passos de tempo da simulação, número de produtores *j* e o número de camadas do reservatório, respectivamente.

Para o cálculo dos parâmetros dinâmicos, a cada mudança nas condições dos poços produtores os dados são truncados e a otimização é realizada utilizando os dados referentes ao

período que se inicia quando ocorre a mudança e finaliza quando ocorrer uma nova mudança, ou a produção do reservatório encerrar.

Portanto, para cada período em que um poço (ou poços) passa a ser inativo (fecha) ou passa a ser ativo (abre) ou ainda, se houve conversão de poço (produtor para injetor), para determinação dos parâmetros desse novo intervalo inicia-se uma nova coleta de dados e uma nova otimização será realizada com esses últimos dados.

4.1.1 Dados para Determinação dos Parâmetros

Nos simuladores tradicionais, a aquisição de dados e seu processamento são estágios que demandam muito tempo para a modelagem e simulação do reservatório de petróleo, porque necessita do trabalho conjunto de um grupo multidisciplinar (como engenheiros e geólogos, por exemplo) analisando e interpretando uma série de dados, com alto custo para serem obtidos, que irão gerar informações para representar as características geológicas do reservatório (permeabilidade, porosidade, entre outros).

No caso do CRM é possível modelar o reservatório de forma bem mais rápida, já que os dados necessários para o modelo são dados de histórico de produção, que são: vazão de injeção, vazão de produção observada e BHP. Esses dados existem disponíveis nos campos, geralmente em grande quantidade, são dados reais, diretamente medidos, portanto confiáveis, com custo para obtenção infinitamente menor que dos dados necessários para modelagem do reservatório nos simuladores tradicionais.

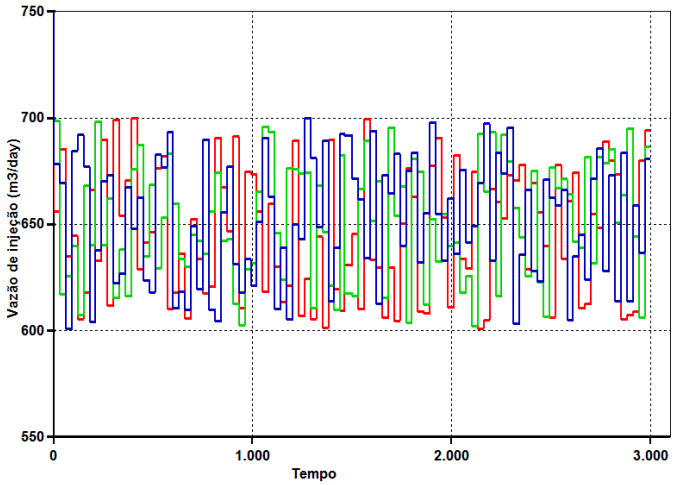
Na prática, deve-se ter o cuidado de analisar os dados do histórico antes deles serem utilizados, pois, como são medidos em campo, pode haver erros nas medições (como erros humanos) que devem ser excluídos do conjunto de dados que serão utilizados para modelar o reservatório através do CRM (Weber, 2009).

Para fins de pesquisa, os dados de histórico podem ser obtidos através de um simulador, ficando então livres desses possíveis erros. No caso desta pesquisa, como não havia disponível dados reais, as vazões de produção observadas foram obtidas através do simulador comercial IMEX (CMG, 2016).

Para que os dados utilizados representem de forma confiável a dinâmica real do reservatório, eles devem abranger todo o intervalo no qual o reservatório opera. No caso deste

trabalho, os dados de entrada, vazão de injeção e BHP (sinais de entrada), foram gerados de forma aleatória sendo especificados apenas os limites superior e inferior desses dados. Seus valores vão sendo modificados a cada intervalo de tempo que se é determinado para o estudo, como degraus, causando perturbações, ou seja, mudança de estado do reservatório. Como resultado, temos a resposta do reservatório (ou do simulador), que é a vazão de produção observada (sinal de saída) variando devido às perturbações de entrada. Essa vazão observada será comparada a vazão que é calculada pela equação do CRM para determinação dos parâmetros.

Figura 7 - Variação aleatória da vazão de injeção como dado de entrada.



Fonte: A autora

Na identificação do sistema, é também importante que os dados amostrais sejam coletados em um mesmo espaço de tempo, evitando que a dinâmica do sistema seja influenciada por um período de tempo com uma alta frequência de amostras.

No CRM clássico, os dados das vazões de injeção e produção utilizados são as vazões totais do poço, já que o reservatório possui uma única camada. No caso do CRM-ML, o dado da vazão de injeção utilizado é a vazão por camada enquanto a vazão de produção continua sendo a total do poço. No caso do CRM-MLMTC, são necessários os dados das vazões de injeção e de produção por camada. Caso não tenha disponível o dado da vazão inicial de produção por camada, ela passa a ser mais um parâmetro para a otimização.

Na prática, nos campos, para termos disponíveis esses dados por camada, é necessária a utilização de poços inteligentes, que possuem uma válvula em cada completação capaz de controlar e medir o fluxo separadamente. No caso dessa pesquisa, as múltiplas completações foram simuladas com múltiplos poços com a mesma localização areal. Os poços são então operados com controles de vazões independentes em cada completação e dessa forma temos disponíveis tanto as vazões de injeção como as de produção por camada.

Outra situação que pode ocorrer na prática é não ter disponível nos dados de histórico o BHP. Nesse caso, então, ele é considerado constante e como consequência o terceiro termo da equação (3.2), que é o termo relacionado a mudança de BHP, e o parâmetro índice de produtividade, J_j serão nulos. Neste trabalho, como foi utilizado o simulador, os dados de BHP estavam disponíveis, porém foram feitos testes utilizando o BHP variável e constante para comparação dos resultados.

4.1.2 Parâmetros do CRM

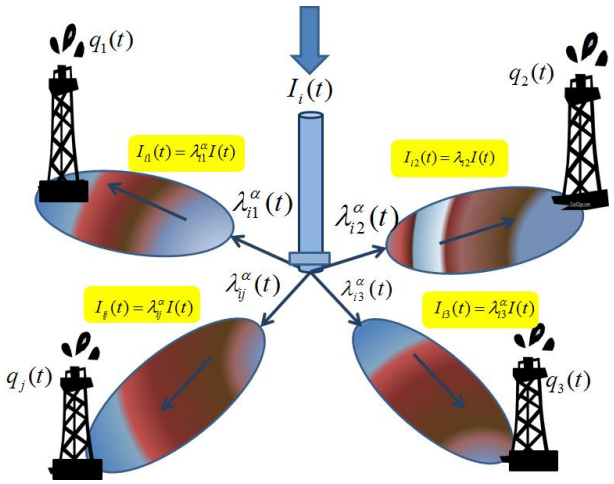
Como mencionado no item 4.1, os parâmetros do CRM são determinados através do problema de otimização, sendo os mesmos as variáveis que serão otimizadas minimizando a diferença entre as vazões de produção calculadas e observadas. Nesta sessão os parâmetros serão discutidos de forma mais detalhada, seus significados físicos e a quantidade de parâmetros na otimização.

- Conectividades (λ_{ij}^{α}):

No CRM, a conectividade entre os poços define a fração do volume de água injetado por um determinado injetor que flui na direção de um determinado produtor influenciando a sua vazão de produção. Pode-se referir também à conectividade como ganho, que relaciona o impacto no sinal da resposta (vazão de produção) causado por uma mudança no sinal da entrada (vazão de injeção).

Para ilustrar, considerando hipoteticamente um injetor i alimentando j produtores, a Fig. 8 representa as conectividades entre o injetor e os produtores (λ_{ij}) e também o volume de água do injetor que segue em direção ao produtor (I_{ij}), que é o produto entre a vazão total de injeção e a conectividade entre o par injetor/produtor ($\lambda_{ij}^{\alpha} I_i$):

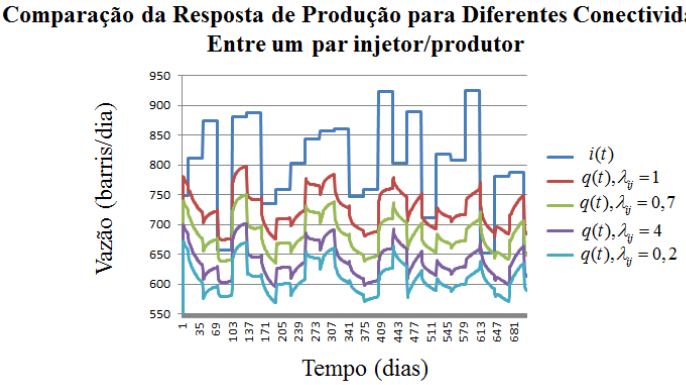
Figura 8 – Conectividades entre o injetor i e os produtores.



Fonte: A autora

Portanto, quanto maior o valor da conectividade, maior será a fração do volume de água do injetor direcionado ao produtor e consequentemente maior será a influência da vazão do injetor na vazão de produção do produtor. É o que mostra a Fig. 9, que representa o gráfico da resposta da produção de um poço produtor j para uma série de mudanças na vazão de injeção de um poço injetor i, para diferentes conectividades entre o par produtor/injetor. Pode-se perceber que quanto maior a conectividade, maior a vazão de produção como resultado da injeção.

Figura 9 - Comparação das respostas (vazão de produção) com diferentes conectividades para uma série de variações no sinal de entrada (vazão de injeção)



Fonte: A autora

Gentil, (2005) interpretou o significado deste parâmetro sendo possível explicá-lo fisicamente como uma razão entre a transmissibilidade (T_{ij}) média entre um par de poços produtor/injetor e a soma entre esse mesmo injetor e todos os outros produtores.

$$\lambda_{ij}^{\alpha} = \frac{T_{ij}^{\alpha}}{\sum_{j=1}^{N_P} T_{ij}^{\alpha}} \tag{4.2}$$

Sendo a transmissibilidade definida por:

$$T_{ij} = \left(\frac{k_r k}{\mu L} A \right)_{ij} \tag{4.3}$$

onde k_r é a permeabilidade relativa, k é a permeabilidade absoluta (do meio poroso), A é a área transversal do fluxo, μ é a viscosidade do fluido e L é o caminho médio necessária para o fluido chegar do injetor I no produtor j. Portanto, a conectividade é uma propriedade da geologia assim como da posição entre poços e independe das vazões de injeção e produção.

A conectividade é um parâmetro de grande valor, pois nos dá indicações de propriedades geológicas do reservatório, como canais de alta permeabilidade e falhas, sem ser necessário determinar os parâmetros geológicos do reservatório a partir de medições e ensaios da rocha.

Os reservatórios de petróleo são formados em rochas sedimentares as quais são compostas de camadas heterogêneas, consequentemente com diferentes transmissibilidades em cada uma. Logo, o fluxo dos fluidos tem diferentes comportamentos nas diferentes camadas do reservatório.

Seguindo o trabalho do Moreno, (2013), na presente dissertação as conectividades são calculadas por camada, sendo, portanto, uma razão entre as transmissibilidades também na camada em que estão sendo calculadas:

$$T_{ij}^{\alpha} = \left(\frac{k_r k}{\mu L} A \right)_{ij}^{\alpha} \tag{4.4}$$

onde T_{ij}^{α} é a transmissibilidade na camada e o termo a direita são as variáveis do reservatório para cada camada. Dessa forma o modelo consegue capturar as heterogeneidades existentes para cada camada, e representa com mais precisão o comportamento do fluxo dos fluidos em cada uma delas.

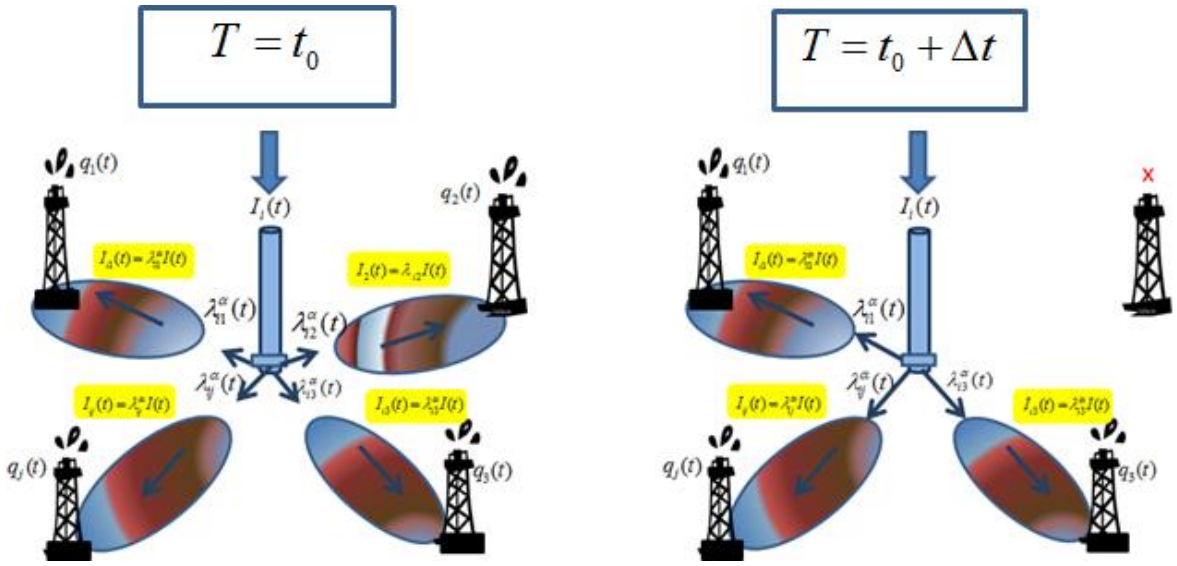
Ainda seguindo o trabalho do Moreno, (2013), as conectividades serão dinâmicas para as estratégias CRM-MLMTC e CRM-ML, pois mudanças como abertura e fechamento de poços provocam modificação no gradiente de pressão do reservatório, o que irá acarretar a redistribuição do fluxo dos fluidos no reservatório e consequentemente modificação das transmissibilidades entre injetores e produtores. Todas essas mudanças nas condições do reservatório provocarão mudanças nas conectividades entre os poços injetores e os produtores.

Poços produtores que fecham deixam de ter comunicação com o injetor, passando a conectividade entre eles a ser nula. Por outro lado, a fração de água que estava sendo direcionada pelo injetor para este poço que fechou será redistribuída entre os poços que continuam produzindo (ativos), aumentando então a fração da injeção que irá para cada um e, portanto, a conectividade entre o injetor e esses últimos. Por outro lado, um poço que abre e passa a ser ativo irá causar a redistribuição do volume de água injetada por determinado injetor entre os produtores que ele já tinha influência, para que parte desse volume passe a ser direcionado para ele, e, por consequência, a conectividade entre o injetor e os produtores que já eram ativos irá diminuir.

A Fig. 10 mostra um poço injetor direcionando a água de injeção para quatro poços produtores no instante $T = t_0$. No instante $T = t_0 + \Delta t$, o poço 2 é fechado e a água que era direcionada para o mesmo é então redistribuída entre os outros 3 poços que continuam ativos. O tamanho das setas representa a conectividade entre o injetor e os produtores. Pode-se perceber que no tempo $T = t_0 + \Delta t$ a conectividade entre o injetor e o produtor 2 passa a ser nula, enquanto as conectividades entre o injetor e os demais poços aumentam, devido à redistribuição da água, que ia em direção ao poço produtor 2, entre os outros 3 poços.

Percebe-se então a importância do cálculo das conectividades de forma dinâmica, devido ao impacto que a condição dos poços exerce sobre as condições do reservatório, e consequentemente no parâmetro da conectividade. Observando a Fig. 10, pode-se perceber que se os parâmetros não fossem dinâmicos, em $T = t_0 + \Delta t$ o modelo continuaria atribuindo um valor de conectividade para o poço 2 no momento em que na realidade ela é nula. Ao mesmo tempo, não mudaria os valores das conectividades dos demais poços que, na situação real, irão aumentar.

Figura 10 - Representação das mudanças das conectividades como consequência do fechamento de um poço.



Fonte: A autora

- Constante do tempo (τ_j)

A definição teórica da constante de tempo dada por Youssef et al., (2006) é dada através de sua definição matemática mostrada na equação (2.13):

$$\tau = \frac{c_t V_p}{J}$$

A constante de tempo está diretamente relacionada ao tempo necessário para que uma mudança na pressão, provocada por uma variação na vazão de injeção, se propague no meio poroso e efetivamente influencie a vazão de produção.

Podemos ver que a constante de tempo é diretamente proporcional a compressibilidade e volume poroso da rocha. Se a constante de tempo é alta, significa que o sistema tem uma resposta lenta podendo ser devido à alta compressibilidade, grande volume poroso ou uma baixa permeabilidade. Por outro lado, se a constante de tempo é pequena, significa que o sistema responde rapidamente ao estímulo, que pode ser devido à baixa compressibilidade, pequeno volume poroso ou alta permeabilidade.

Nesta dissertação, para o modelo CRM-MLMTC, assim como as conectividades, a constante de tempo também será calculada para cada camada do reservatório, para continuar levando em consideração as heterogeneidades que possam existir entre elas.

De acordo com Moreno, (2013), a constante de tempo tem um impacto menor no resultado do modelo CRM que as conectividades, podendo-se fazer uma simplificação do modelo CRM-MLMTC, que será o CRM-ML para o qual apenas as conectividades são calculadas por camada, a constante de tempo será única para o poço, sem perda significativa de qualidade dos resultados.

Moreno também considerou que, em geral, a atualização do cálculo das conectividades com as mudanças das condições do poço, tem um importante impacto no modelo CRM, porém, as constantes de tempo, tem um impacto bem menos significativo. Posto isso, ele propões, em situações comuns, a utilização das conectividades dinâmicas, mas as constantes do tempo fixas, e apenas utilizar as constantes do tempo dinâmicas caso seja necessário, se o modelo e suas condições demandarem um maior detalhamento de estudo.

Nessa pesquisa, porém, considerou-se, da mesma forma que as conectividades, também as constantes de tempo dinâmicas, variando cada vez que houver mudança nas condições dos poços do reservatório em análise.

A constante do tempo é formulada em função da equação (2.13), sendo, como mostrado, função da compressibilidade total (C_t), volume poroso (V_p) e índice de produtividade (J_j). A compressibilidade total é definida como:

$$C_t = C_0 S_0 + C_w S_w + C_r \tag{4.5}$$

Onde C_0, C_w e C_r são as compressibilidades do óleo, da água e da rocha, respectivamente, e S_0 e S_w as saturações.

Em reservatórios de fluxo maduro, como os casos estudados por Moreno, considera-se que as compressibilidades do óleo e da água são assumidas pequenas em relação à compressibilidade da rocha e tendo o fluxo já um alto percentual de água, não vai haver maiores modificações nas saturações dos fluidos. Partindo dessas premissas, a compressibilidade total (C_t) pode ser considerada constante, e considerando também

constantes o volume poroso (V_p) e o índice de produtividade (J_j), a constante de tempo (τ_j) pode ser mantida constante, não sendo necessário ficar atualizando o seu valor.

Como já foi discutido, a abertura e o fechamento de poços irão causar impacto no gradiente médio de pressão do reservatório e consequentemente no fluxo dos fluidos e as variáveis que definem a constante de tempo (τ_j) são sensíveis a essas condições. Por esse motivo, considerou-se importante o estudo do modelo considerando a variação deste parâmetro.

- Índice de Produtividade (J_j)

O índice de produtividade define a queda na pressão necessária em um dado produtor para ele produzir um determinado fluxo. Da equação (2.11) chega-se a:

$$J_j = \frac{q^j(t)}{\Delta p} \tag{4.6}$$

Nesse estudo o (J_j) foi também calculado por camada para o CRM-MLMTC. Considerando-se, porém, que o impacto das conectividades no resultado do modelo é bem mais significativo do que o do índice de produtividade, foi feita a mesma simplificação que foi mostrada anteriormente com relação a constante de tempo, e para o CRM-ML o índice de produtividade foi considerado único para o poço.

O cálculo do índice de produtividade (J_j) depende de propriedades da rocha e do fluido. Se o reservatório encontra-se em uma condição de fluxo estacionária, com pressões constantes, então as propriedades da rocha e do fluido estarão também constantes e nessas condições o índice de produtividade J_j também será constante. No caso de um fluxo transiente, ele já não é mais constante.

Nesse estudo o J_j foi também considerado um parâmetro dinâmico para o CRM-MLMTC e CRM-ML, à medida que mudanças no de abertura e fechamento dos poços causam mudanças no gradiente de pressão e, portanto, no estado estacionário do reservatório.

Em alguns casos não se tem disponível o valor do BHP, e nessa situação considera-se o BHP constante e índice de produtividade J_j passa a ser nulo. Nessa pesquisa, como foi utilizado o simulador IMEX, pode-se ter os dados do BHP disponíveis e realizar o cálculo desse parâmetro na otimização.

4.1.3 Restrições

Como discutido por Weber, (2007), existem restrições físicas para os parâmetros. Holanda, (2015) assumiu que além das restrições físicas, também terão restrições para possibilitar a solução computacional do problema.

$$\sum_{i=1}^{N_P} \lambda_{ij}^{\alpha} \leq 1, \qquad \text{para todo } i, \alpha \tag{4.7}$$

Para manter a conservação de massa, sendo as conectividades frações do volume total do injetor, a soma das conectividades do injetor não pode ser maior que um. Se a soma das conectividades for menor que um, significa que está havendo perda de água injetada no reservatório. Por outro lado, se a soma for maior que um, significa que existe outra fonte de água para o reservatório além da injetada pelo injetor, e o reservatório deve então ser modelado de outra forma.

$$0 \leq \lambda_{ij}^{\alpha} \leq 1, \qquad \text{para todo } i, \alpha \tag{4.8}$$

As conectividades também devem estar entre zero e um. A conectividade não pode ser maior que um, se não já iria violar a restrição da soma ser menor ou igual a um. Ser menor que zero, fisicamente, não teria sentido.

$$\tau \geq \tau_{mín} \tag{4.9}$$

A constante de tempo (τ) não pode ser igual a zero. Pela sua definição matemática, uma constante de tempo igual a zero significa fluido e rocha incompressíveis, ou volume poroso igual a zero, o que fisicamente não faz sentido, esses parâmetros podem ter valores pequenos, mas não nulos. Ainda, representaria um índice de produtividade (J), para um determinado volume de controle, infinito.

Além disso, a constante de tempo igual a zero causaria uma instabilidade nas equações da vazão de produção, à medida que os termos exponenciais tem esse parâmetro como divisor.

Por esses motivos, invés de assumir $\tau \geq 0$, assumimos que $\tau \geq \tau_{mín}$, onde, $\tau_{\min} \approx 0$.

$$\tau_{mín} \leq \tau_j^{\alpha} \leq \tau_{máx}, \text{ e } J_{mín} \leq J_j^{\alpha} \leq J_{máx} \text{ para todo } j, \alpha \qquad (4.10) \text{ e } (4.11)$$

É necessário definir limites máximos para τ e para J, que são $\tau_{máx}$ e $J_{máx}$. Isso ajuda a convergência do algoritmo e evita que uma constante de tempo possa divergir para infinito quando não ocorre a resposta para um estímulo, o que pode ocorrer devido a uma barreira selante entre os poços produtor e injetor.

4.1.4 Quantidade de Parâmetros no Problema de Otimização

O número de parâmetros da otimização, N_{par}, irá depender primeiramente da estratégia do CRM utilizada (se divide o reservatório em camadas e a simulação em intervalos de tempo, ou não). Será função do número de produtores ativos no intervalo de tempo da simulação, N_{P_ativos}, do número de injetores e, no caso de dividir o reservatório em camadas, do número de camadas em que o mesmo será divido. A quantidade de parâmetros irá depender também se o BHP é considerado constante ou variável e se vazão inicial dos produtores é conhecida, se não ela passa a ser mais um parâmetro para ser otimizado.

Quando a simulação é dividida em intervalos de tempo, devido à abertura e fechamento de poços, temos parâmetros dinâmicos, e para o mesmo problema, diferentes números de parâmetros nos diferentes intervalos de tempo (porque irá mudar o número de produtores ativos).

. Temos então as seguintes situações por intervalo de simulação:

- Se, α = 1 e os parâmetros são fixos durante a simulação, significa que temos um reservatório de uma única camada com um único intervalo de simulação, ou seja, o modelo CRM originalmente proposto, que passa então a representar um caso particular do modelo de múltiplas camadas. Neste caso, o número de parâmetros da otimização será: $N_{par} = N_{P_ativos}(N_I + 3)$ se o BHP é variável (então o J é

calculado) e a vazão inicial dos produtores não é conhecida (então a vazão inicial é um parâmetro a ser otimizado). Esse número de parâmetros se explica pois, tem-se uma conectividade entre cada par produtor injetor (λ_{ij}), e uma constante de tempo (τ_j), um índice de produtividade (J_j) e, e uma vazão inicial (q_{0j}), por produtor, logo:

- N_{P_ativos} *N_I: representa a parcela do número de conectividades envolvidas no problema;
- N_{P_ativos} *3: representa a parcela dos demais parâmetros, que são, τ_j, J_j e $q_{0j,}$ de cada produtor.

$N_{par} = N_{P_ativos}(N_I + 2)$, considerando o BHP variável (então o *J* é calculado) e as vazões iniciais conhecidas (então a vazão inicial não é um parâmetro a ser otimizado). Neste caso:

- N_{P_ativos} *2: representa a parcela dos demais parâmetros, que são, τ_j e J_j de cada produtor.

e $N_{par} = N_{P_ativos}(N_I + 1)$, para o BHP constante (então o *J* não é calculado) e vazões iniciais conhecidas (então a vazão inicial não é um parâmetro a ser otimizado), e neste caso

- . N_{P_ativos} *1: representa a parcela apenas do parâmetros τ_j de cada produtor.

Seguindo o mesmo raciocínio, mas agora considerando o número de camadas:

- Se, α >1 e se as conectividades estão função da camada α mas a constante do tempo e o índice de produtividade são únicos para o poço, temos então o CRM-ML e o número de parâmetros da otimização, será: $N_{par} = N_{P_ativos}\left[(N_I \times N_l) + 3\right]$ se o BHP é variável e a vazão inicial dos produtores não é conhecida. $N_{par} = N_{P_ativos}\left[(N_I \times N_l) + 2\right]$, considerando o BHP variável e as vazões iniciais conhecidas e $N_{par} = N_{P_ativos}\left[(N_I \times N_l) + 1\right]$, para o BHP constante e vazões iniciais conhecidas.

- Se, α >1, e todos os parâmetros estão em função da camada α·, o modelo será o CRM-MLMTC, e o número de parâmetros da otimização será: N_{par} = $N_{P_ativos}\left[(N_I \times N_l)+(3\times N_l)\right]$ se o BHP é variável e a vazão inicial dos produtores não é conhecida. $N_{par} = N_{P_ativos}\left[(N_I \times N_l)+(2\times N_l)\right]$, considerando o BHP variável e as vazões iniciais conhecidas e $N_{par} = N_{P_ativos}\left[(N_I \times N_l)+(1\times N_l)\right]$, para o BHP constante e vazões iniciais conhecidas.

Resumindo:

Tabela 1 - Número de parâmetros para cada formulação do CRM, como função da disponibilidade dos dados do BHP e das vazões iniciais dos poços produtores.

	CRM $\alpha = 1$ N_{par}	CRM-ML $\alpha >1$ N_{par} (Por intervalo)	CRM-MLMTC $\alpha >1$ N_{par} (Por intervalo)
BHP = variável e q_0 desconhecida	$N_{P_ativos}(N_I+3)$	$N_{P_ativos}\left[(N_I \times N_l)+3\right]$	$N_{P_ativos}\left[(N_I \times N_l)+(3\times N_l)\right]$
BHP = variável e q_0 conhecida	$N_{P_ativos}(N_I+2)$	$N_{P_ativos}\left[(N_I \times N_l)+2\right]$	$N_{P_ativos}\left[(N_I \times N_l)+(2\times N_l)\right]$
BHP=constante e q_0 conhecida	$N_{P_ativos}(N_I+1)$	$N_{P_ativos}\left[(N_I \times N_l)+1\right]$	$N_{P_ativos}\left[(N_I \times N_l)+(1\times N_l)\right]$

4.2 ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO

Para termos sucesso na resolução de um problema de otimização, em termos não só dos resultados finais, mas também do tempo e esforço computacional necessário para resolvê-lo, é preciso que o problema seja bem formulado e definido. Portanto, análises preliminares do processo, de suas variáveis e restrições, devem ser realizadas e o problema a ser resolvido deve ser detalhadamente analisado para que seja aplicada a técnica de otimização mais adequada ao tipo de problema, no que se refere a sua função objetivo e restrições. Além disso, deve-se analisar se a formulação do problema é de dimensão elevada, e se é possível particionar o problema em partes menores, ou simplificar a função objetivo e/ou o modelo, tornando mais simples e eficiente a obtenção da solução final.

Portanto, é de extrema importância formular adequadamente um problema de otimização, porque a solução ideal será tão boa quanto a sua formulação. No entanto, uma vez que o problema está devidamente formulado, geralmente temos disponíveis bons softwares para resolvê-lo, e é também necessário fazer uma boa escolha dessa ferramenta.

De acordo com Arora, (2004), devemos usar os seguintes passos no procedimento de formulação de um problema de otimização:

a) Passo 1: declaração do projeto / problema.
b) Passo 2: Coleta de dados e informações.
c) Passo 3: Identificação / definição de variáveis de projeto.
d) Passo 4: Identificação de um critério a ser otimizado.
e) Passo 5: identificação de restrições.

No caso deste trabalho, esses passos serão os seguintes:

a) Passo 1: declaração do projeto / problema

No caso deste estudo, o objetivo é determinar, através de um problema de otimização, os parâmetros da equação analítica do modelo CRM, a qual descreve a vazão de produção dos produtores de um reservatório, utilizando como dados a vazão real observada de injeção e BHP dos poços produtores, sem que seja necessário determinar as características geológicas para sua modelagem. A vazão de produção é considerada uma resposta ao estímulo da vazão de injeção e mudanças de BHP. Determinados os parâmetros, as vazões de produção podem ser calculadas através desta equação analítica que foi desenvolvida para o modelo.

b) Passo 2: Coleta de dados e informações.

Para formular o problema, os dados necessários, como já explicado anteriormente, são os dados reais de vazão de injeção, produção e BHP. No caso deste trabalho, não havia disponível esses dados reais para serem utilizados e, portanto, para fins de pesquisa, utilizou-se o simulador IMEX para obter a vazão de produção como resposta a estímulos de variação da vazão de injeção e BHP.

Os dados foram então gerados a partir do seguinte procedimento:

- Informar dados aleatórios de BHP dos poços produtores e vazões de injeção para o simulador, para obter resultados das vazões nos produtores. Esses dados informados são alterados a cada 30 dias durante a simulação, e os resultados das vazões de produção obtidos (coletados) por dia. Para que tenhamos uma boa representação das condições do reservatório, é necessário que os dados de entrada variem dentro de um intervalo que abranja a variação natural de operação do sistema.

c) Dividir os dados de produção dos poços em intervalos de tempo, de acordo com fechamento e/ou abertura dos poços produtores. Este procedimento é realizado no otimizador,(MATLAB) o qual faz a leitura dos dados entregues pelo simulador (IMEX). Em cada tempo em que se detectar que um determinado produtor estava produzindo e passa a ter vazão de produção nula (fechamento do produtor) ou no caso de um produtor ter produção nula e passar a apresentar vazão de produção (abertura do produtor), os dados são truncados, encerrando um conjunto de dados e dando início a um novo, assim sucessivamente até o final da leitura dos dados. Dessa forma, o intervalo total dos dados observados é divido em subintervalos, e para cada subintervalo é realizada uma otimização para o cálculo dos parâmetros, considerando-se apenas os poços ativos no respectivo intervalo de tempo.

d) Passo 3: Identificação / definição de variáveis de otimização.

As variáveis de otimização são os parâmetros que compõe a equação analítica da vazão de produção do CRM e serão calibrados para ajustar os dados calculados aos observados. Generalizando, para os modelos de CRM apresentados neste trabalho, as variáveis são:

- λ_{ij}^{α} = conectividade entre injetor ***i*** e produtor *j* na camada α.
- τ_{j}^{α} = constante de tempo do produtor ***j*** na camada α.
- J_{j}^{α} = índice de tempo do produtor ***j*** na camada α.

e) Passo 4: Identificação de um critério a ser otimizado.

O objetivo do problema é determinar os parâmetros do modelo, em posse de dados reais das vazões de produção observadas (vazões medidas em campo, ou, no caso deste

estudo, as vazões fornecidas pelo simulador) e obtidos através do modelo CRM (através do cálculo da equação analítica).

A função objetivo será o somatório dos erros entre a vazão observada e a calculada em cada passo de tempo da simulação, em todos os poços produtres ativos no campo, de forma a obter o melhor ajuste entre esses valores. A função objetivo é não linear em relação aos parâmatros (variáveis de projeto).

$$\text{Minimize} \sum_{k=1}^{N_t}\sum_{j=1}^{N_P}\left(q_k^{j,obs} - q_k^{j,cal}\right)^2 \tag{4.12}$$

f) Passo 5: identificação de restrições.

As restrições já foram anteriormente explicadas, e estão a seguir:

$$\sum_{i=1}^{N_P}\lambda_{ij}^{\alpha} \leq 1, \qquad \text{para todo } i,\alpha \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned} &0 \leq \lambda_{ij}^{\alpha} \leq 1, && \text{para todo } i,\ \alpha \\ &\tau_{mín} \leq \tau_j^{\alpha} \leq \tau_{máx}, && \text{para todo } j,\ \alpha \\ &J_{mín} \leq J_j^{\alpha} \leq J_{máx}, && \text{para todo } j,\ \alpha \end{aligned} \tag{4.14}$$

Podemos perceber que temos uma restrição de desigualdade, a equação (4.13), sendo as demais restrições de limites, todas elas lineares.

Em posse do problema de otimização devidamente formulado, deve-se analisar as carcterísiticas da função objetivo e das restrições do problema. Sendo a função objetivo não linear, ele deve ser resolvido através de um algoritmo de programação não linear.

Além disso, é importante também o desenvolvimento de estratégias para determinar um "ponto de partida quente" (warm start), ou seja, um bom ponto inicial para otimização. Muitos algoritmos de otimização, como sequencial linear e quadrática requerem a solução de uma seqüência de subproblemas menores de otimização relacionados ao problema principal. Portanto, o desenvolvimento de estratégias efetivas de "partida quente" é essencial para reduzir o custo computacional de tais seqüencias amplamente utilizadas nesses algoritmos.

Weber, (2009), considerando a complexidade do problema, principalmente quando aplicado a um campo com uma grande quantidade de poços, utilizou uma estratégia que

permite dividir o problema em dois, que chamou de desacoplado e acoplado. O problema desacoplado se torna mais simples e dá o "ponto de partida quente" para o problema acoplado.

4.2.1 Problema Desacoplado

A equação (4.13) é a restrição que representa o balanço material do fluido injetado, permitindo uma perda de água injetada no volume de controle quando a soma das conectividades é menor que um. Como as conectividades na equação (4.13) são somadas sobre o índice do produtor j (do injetor para todos os produtores), a aplicação dessa restrição exige a resolução da determinação dos parâmetros do modelo para todos os produtores ao mesmo tempo. Não é possível minimizar os termos da equação (3.2), correspondente a cada produtor j separadamente quando a restrição da equação (4.13) está presente, porque as conectividades resultantes podem violar essa restrição.

Porém, se essa restrição for "relaxada" (ignorada), os parâmetros para cada produtor podem ser encontrados independentemente (desacoplados), e esse procedimento é usado para determinar valores iniciais para o problema acoplado, pois fornece um "ponto de partida quente" (warm start) para resolver o problema acoplado, que é mais complexo, à medida que abrange todos os produtores simultaneamente. O problema desacoplado será resolvido através do método dos mínimos quadrados.

Para resolver o problema desacoplado, parte-se de um ponto inicial para minimizar a função objetivo, para cada poço produtor $j = 1 \cdots N_P$ e terá a seguinte forma:

$$
\begin{aligned}
&\text{Minimize } \sum_{k=1}^{N_t} \left(q_k^{j,\text{obs}} - q_k^{j,cal} \right)^2 \quad \text{com } q_k^{j,cal} = \sum_{\alpha=1}^{N_L} Q_\alpha^j \\
&\text{Sujeito a: } \quad 0 \le \lambda_{ij}^{\alpha} \le 1, \qquad \text{para todo } i,\ \alpha \\
&\qquad\qquad \tau_{mín} \le \tau_j^{\alpha} \le \tau_{máx}, \qquad \text{para todo } \alpha \\
&\qquad\qquad J_{mín} \le J_j^{\alpha} \le J_{máx}, \qquad \text{para todo } \alpha
\end{aligned}
\tag{4.15}
$$

O resultado do problema desacoplado é utilizado como ponto de partida para a resolução do problema acoplado. Antes de utilizar esse resultado, porém, deve-se fazer a verificação se a solução do problema desacoplado viola a restrição da função objetivo (4,13), pois o problema acoplado deve ter como ponto de partida uma solução viável.

Caso a solução do problema desacoplado esteja violando a restrição da função objetivo, utilizar um filtro para que o resultado dado pelo problema desacoplado passe a atender a restrição tornando o ponto de partida do problema acoplado uma solução viável. O filtro é feito de acordo com a equação (4.16) a seguir:

$$\text{Se } \sum_{j=1}^{N_P} \lambda_{ij}^{\alpha} > 1, \text{ então}$$
$$\overline{\lambda_{ij}^{\alpha}} \leftarrow \gamma \lambda_{ij}^{\alpha} \quad \text{onde } \gamma = 1 \Big/ \sum_{j=1}^{N_P} \lambda_{ij}^{\alpha} \tag{4.16}.$$

e $\overline{\lambda_{ij}^{\alpha}}$ é o novo valor da conectividade entre opoço injetor i e j que será usado no problema acoplado.

4.2.1.1 – Método dos Mínimos Quadrados

Para resolver o problema desacoplado, foi utilizada a técnica dos mínimos quadrados (*Least Squares)*. Em mínimos quadrados, a função objetivo tem a seguinte forma:

$$\text{Minimize } f(x) = \sum_{i=1}^{n} \left[T_i(x) \right]^2 \tag{4.17}$$

Onde $T_i(x)$ é a $i-ésima$ diferença entre os valores calculados de um modelo e o valor real observado no comportamento do sistema. No caso deste trabalho, é o resíduo entre vazão do produtor, em um tempo t, observada no campo, ou obtida em simuladores, e a vazão calculada através da função analítica, ou seja, do modelo desenvolvido.

O problema dos mínimos quadrados é utilizado em muitas áreas de aplicação, e é uma ferramenta robusta para otimização de problemas restritos. Minimizando essa função são encontrados os valores para os parâmetros que melhor correlacionam o modelo e os dados reais.

Fazendo a primeira derivada de $f(x)$ (gradiente) e a segunda derivada (hessiana), resultam funções contendo os seguintes termos:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} \rightarrow T_i(x) T_i^{'}(x) \tag{4.18}$$

$$\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \to T_i(x)T_i^{''}(x) + \left[T_i^{'}(x)\right]^2 \tag{4.19}$$

Assumindo que $T_i(x)$ tende a zero próximo da solução, então o primeiro termo da matriz hessiana (4.16) tenderá a zero, e a matriz hessiana das segundas derivadas de $f(x)$ pode ser aproximada usando apenas as primeiras derivadas de $T_i(x)$.

Os algoritmos para resolução dos mínimos quadrados são em geral baseados na aproximação de Gauss-Newton, que exibe razão de convergência quadrático próximo a solução, para esses casos em que a aproximação da hessiana é precisa, isto é, quando os resíduos tendem a zero na solução.

A grande vantagem de usar esse método é que devido a sua estrutura matemática ele possibilita a obtenção da matriz hessiana utilizando derivadas apenas de primeira ordem, sendo então uma estrutura especial que o torna mais fácil de resolver do que problemas gerais de minimização restrita. Além disso, explorando essa estrutura do problema, a convergência de segunda ordem característica do algoritmo de Newton pode ser obtida utilizando apenas derivadas de primeira ordem.

Como, porém, no MATLAB, apenas é possível resolver através de mínimos quadrados problemas com restrições de limites, utilizamos essa estratégia de desacoplar o problema, resolvendo inicialmente um problema sem a restrição de desigualdade e apenas com restrições as restrições de limites. Essa estratégia tem a grande vantagem de dividir o problema em dois, sendo o primeiro mais simples e que é possível ser resolvido através da técnica dos mínimos quadrados que é uma ferramenta muito robusta, de rápida convergência, e que irá determinar os valores iniciais da otimização para o caso acoplado, pois gera um bom ponto de partida para resolver o problema com todas as restrições.

A otimização do problema desacoplado foi realizada utilizando a função *lsqnonlin*, do optimization toolbox do MATLAB, a qual resolve problemas de mínimos quadrados não linear com restrições de limites.

4.2.2 Problema Acoplado

Utilizando o resultado do problema desacoplado filtrado como ponto de partida, será resolvido então o problema acoplado, que envolve todas as restrições, ou seja, otimiza todos os parâmetros de todos os poços simultaneamente, e tem a forma mostrada na equação (4.3).

O problema acoplado envolve restrições de limites e também de desigualdade unilateral, e por esse motivo a função mais apropriada e utilizada para resolvê-lo é a função *fmincon* do optimizations toolbox do MATLAB, solver *SQP (Sequential Quadratic Programming)*. Essa função resolve problemas não lineares de otimização com todos os tipos de restrições. Tanto no problema acoplado como no problema desacoplado, o gradiente foi calculado por diferenças finitas.

Como resultado final do problema, teremos diferentes conjuntos de parâmetros para cada intervalo de tempo da simulação. Caso a simulação tenha apenas um intervalo de tempo, teremos um único resultado para os parâmetros.

4.2.2.1 Algoritmo Programação Sequencial Quadrático (SQP, Sequential Quadratic Programming)

A classe mais geral de problemas de otimização é aquela onde a função objetivo e as restrições, ambas, são não lineares em relação às variáveis de otimização. Estes problemas podem ser resolvidos através de uma série de métodos, e entre eles, o algoritmo SQP mostra uma grande eficácia para resolver problemas não lineares restritos, podendo ser utilizado com todos os tipos de restrições.

O procedimento do algoritmo para solução do problema consiste em resolver uma série de subproblemas quadráticos (*quadratic problem,* QP*)* de forma sequencial, e como consequência, refere-se ao método como Programação Quadrática Sequencial.

O método SQP emprega o método de Newton (ou Quasi-Newton) para resolver as condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) do problema original. Como resultado, ao invés de se resolver o problema original, resolve-se, em cada iteração, um subproblema de minimização quadrática (PQ), que consiste em uma aproximação quadrática da função Lagrangeana do problema sobre uma aproximação linear das restrições.

Partindo-se então do problema não linear original:

$$\begin{aligned} &\textit{Minimizar } f(x) \\ &\textit{Sujeito a } h(x) = 0 \\ &\qquad g(x) \le 0 \end{aligned} \tag{4.20}$$

com o uso da função de Lagrange:

$$L(x,\lambda,\mu) = f(x) + \lambda^T h(x) + \mu^T g(x) \tag{4.21}$$

chega-se ao seguinte conjunto de equações:

$$\nabla L(x,\lambda,\mu) = \nabla f(x) + \lambda^T \nabla h(x) + \mu^T \nabla g(x) \tag{4.22}$$

$$\begin{aligned} &h(x) = 0 \\ &g_j(x) = 0,\ j \in \text{ (restrições ativas)} \\ &\mu_i(x) \ge 0, i \in \text{(restrições inativas)} \end{aligned} \tag{4.23}$$

que é transformado em sucessivos problemas de programação quadrática. O método SQP, a cada iteração, resolve o seguinte problema de programação quadrática:

$$\begin{aligned} &\textit{Minimize } \nabla^T f(x^k)d + \frac{1}{2} d^T H(x^k, \lambda^k, \mu^k)d \\ &\qquad \textit{sujeito a } h(x^k) + \nabla^T h(x^k)d = 0 \\ &\qquad\qquad g(x) + \nabla^T \mathrm{g}(x^k)d \le 0 \end{aligned} \tag{4.24}$$

Ao contrário de outros métodos que tentam converter o problema em uma sequência de subproblemas de otimização sem restrições, o SQP tenta resolver o problema de otimização iterativamente onde a solução em cada passo é obtida pela solução de uma aproximação do problema não linear onde a função objetivo ($f(x)$) é substituída por uma aproximação quadrática e as restrições não lineares ($h(x)$ e $g(x)$) são substituídas por aproximações lineares.

A cada iteração é determinada a melhor direção de busca a partir do ponto (x^k) e então se procede a atualização para o próximo ponto, $x^{k+1} = x^k + \alpha d^k$, onde α =valor do passo e $d^k =$ direção de busca. Como parte da solução do problema de programação quadrática tem-se também a atualização dos multiplicadores de Lagrange λ^{k+1} e μ^{k+1}.

Este procedimento geralmente é feito com o uso de técnicas de *linesearch* (minimização unidirecional de uma função de mérito) ou pela limitação do problema quadrático indicado na região de confiança. A matriz hessiana $H(x^k, \lambda^k, \mu^k)$ é uma aproximação positiva definida da matriz Hessiana da função de Lagrange, que pode ser atualizada por qualquer método da métrica variável, que engloba todos os métodos que utilizam a primeira e/ou a segunda derivada da função objetivo (DFP – David – Fletcher - Powell, BFGS – Broyden –Fletcher – Goldfarb - Shanno, etc.). Para resolver os problemas deste trabalho, foi utilizada a função *fmincon* do pacote optimization do software MATLAB e para a atualização da matriz Hessiana foi utilizado o método BFGS.

4.2.3 Resumo

A tabela a seguir mostra um resumo dos problemas desacoplado e acoplado:

Tabela 2 - Comparação dos problemas desacoplado e acoplado.

PROBLEMA	**DESACOPLADO**	**ACOPLADO**
Função Objetivo	Minimize $\sum_{k=1}^{Nt}\left(q_k^{j,obs} - q_k^{j,cal}\right)^2$	Minimize $\sum_{k=1}^{N_t}\sum_{j=1}^{N_P}\left(q_k^{j,obs} - q_k^{j,cal}\right)^2$
Restrições	- $0 \le \lambda_{ij}^{\alpha} \le 1$, para todo i, α $\tau_{mín} \le \tau_j^{\alpha} \le \tau_{máx}$, para todo j, α $J_{mín} \le J_j^{\alpha} \le J_{máx}$, para todo j, α $q_{0mín} \le q_{0j}^{\alpha} \le q_{0máx}$, para todo j, α	$\sum_{i=1}^{N_P} \lambda_{ij}^{\alpha} \le 1$, para todo i, α $0 \le \lambda_{ij}^{\alpha} \le 1$, para todo i, α $\tau_{mín} \le \tau_j^{\alpha} \le \tau_{máx}$, para todo j, α $J_{mín} \le J_j^{\alpha} \le J_{máx}$, para todo j, α $q_{0mín} \le q_{0j}^{\alpha} \le q_{0máx}$, para todo j, α
Variáveis de Projeto	λ_{ij}^{α} τ_j^{α} J_j^{α}	λ_{ij}^{α} τ_j^{α} J_j^{α}
Função do Matlab Optimization Toolbox	*Lsqnonlin* Nonlinear least squares with upper and lower bound (aceita apenas restrições de limites)	*fmincon* Multidimensional constrained nonlinear optimization (aceita todos os tipos de restrições)
Solver	Levenberg-Marquardt	SQP *Sequential Quadratic Programming*
Gradiente	Calculado por diferenças finitas	Calculado por diferenças finitas

Ponto de Partida	$\lambda_{ij}^{\alpha} = \frac{1}{N_{\mathrm{Prod_ativos}}}$; $\tau_j = \frac{\tau_{máx}}{2}$; $J_j = \frac{J_{máx}}{2}$; $q_{0j}^{\alpha} = 0.5$ (parâmetro normalizado)	A solução do problema desacoplado (sem violar a restrição)
Tolerância	Por default = 10^{-6}	Por default = 10^{-6}

5 CASOS ESTUDADOS E RESULTADOS

Neste capítulo serão aplicados os modelos de CRM aos exemplos estudados, sendo eles o clássico modelo CRM, e os modelos implementados neste trabalho, o CRM-ML, CRM-MLMTC e o CRMP-D. Os resultados obtidos para cada um deles serão discutidos e seus desempenhos são avaliados e comparados.

Os modelos CRM-ML e CRM-MLMTC introduzem parâmetros adicionais ao CRM tradicional, com a finalidade de descrever o comportamento do fluxo dos fluidos em cada camada do reservatório, e os torna dinâmicos, calculando novos valores para os parâmetros para diferentes intervalos de tempo da produção, ou no caso deste trabalho, da simulação. É importante realizar a verificação desses parâmetros para validação desses modelos propostos, o que pode ser feito pela avaliação da sua capacidade de ajustar seus resultados aos dados de histórico, ou seja, aos dados observados. Esse ajuste pode ser feito através do gráfico da comparação das curvas entre os dados das vazões líquidas de produção calculadas pelas equações do modelo CRM e os dados de histórico (observados).

Os reservatórios de petróleo reais são heterogêneos, ou seja, são compostos por diferentes rochas com diferentes características geológicas. Então, para os modelos sintéticos serem uma boa representação da realidade destes reservatórios, eles devem incluir as heterogeneidades encontradas nos mesmos, e esses modelos tem grande importância na validação dos modelos matemáticos, pois todos os seus aspectos são previamente conhecidos.

Neste trabalho foram utilizados dois modelos sintéticos para avaliar as respostas das três diferentes estratégias do CRM. No primeiro caso, um modelo sintético foi estudado e nele foram incluídas modificações, como canais de alta permeabilidade e falha selante, para

analisar o comportamento das estratégias em situações de diferentes graus de heterogeneidade em um reservatório. No segundo caso, foi estudado um modelo que apresenta grande heterogeneidade e possui características semelhantes às situações reais, o Brush Canyon Outcrop (BCO). O estudo deste último foi realizado considerando a conversão de um poço produtor em injetor, para avaliar também a capacidade dos modelos CRM de ajustarem seus resultados quando é realizado esse procedimento.

Para cada caso estudado foram calculados os parâmetros dos modelos CRMP clássico, do CRM-ML e do CRM-MLMTC. Com os valores dos parâmetros obtidos para cada um desses modelos, foram construídas as respectivas curvas das vazões calculadas.

Através da análise dos valores dos parâmetros calculados, assim como pelo ajuste entre as curvas das vazões de produção calculadas e observadas, foi possível demonstrar a capacidade de cada uma das estratégias de capturar as diversas heterogeneidades impostas aos casos estudados.

As simulações para obtenção das informações observadas foram realizadas através do simulador comercial de reservatórios IMEX (CMG, 2016). A seguir será realizada a descrição de cada um dos casos estudados com as suas variações.

5.1 CASO 1 E SUAS VARIAÇÕES – EXEMPLOS A, B, C

O caso 1 é um modelo sintético, com 3 camadas isoladas entre si, com 33x33 células ativas, de duas fases (óleo e água). Logo não há fluxo cruzado, ou seja, não há fluxo entre as camadas do reservatório.

A permeabilidade horizontal por camada é 100, 300 e 150 mD, na primeira, segunda e terceira, respectivamente. A permeabilidade vertical nas camadas é 10% da permeabilidade horizontal. A porosidade é 20% e a pressão inicial do reservatório é 1250 psi. A vazão de injeção tem restrição mínima e máxima de 400 e 700 bbl/dia por completação, ou seja, 1200 a 2100 por injetor, pois todos são completados nas três camadas. A vazão de produção é controlada pelo BHP o qual pode variar entre 120 e 160 psi e não foram consideradas nesse problema restrições de produção nem de plataforma.

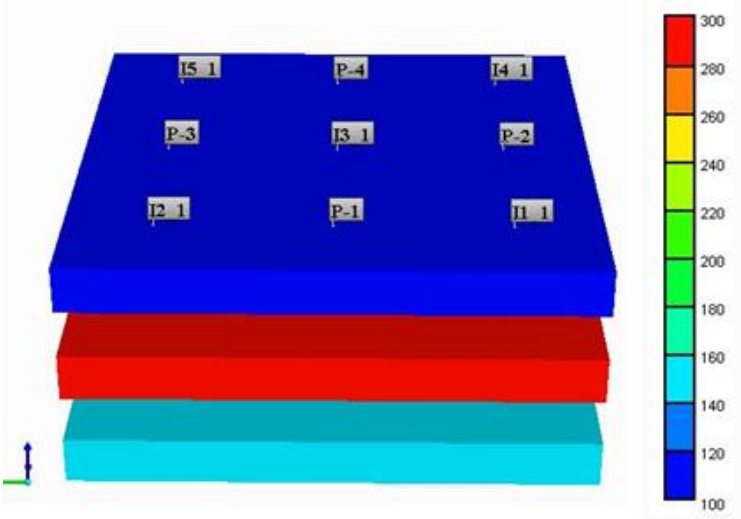
O modelo tem nove poços, sendo cinco injetores e quatro produtores, completados verticalmente em todas as camadas e distribuídos de forma simétrica. A tabela 3 mostra as principais características do modelo:

Tabela 3 - Características principais do modelo sintético.

PARÂMETROS	VALORES
Grid block	33x33x5
Grid block size (ft)	77.5x77.5x70
Permeabilidade (md)	200
Porosidade	0.2
Compressibilidade do óleo (psi^{-1})	$3x10^{-5}$
Compressibilidade da água (psi^{-1})	$1x10^{-6}$
Saturação de água irredutível	0.3
Saturação residual de óleo	0.4
Permeabilidade relative da água	0.3
Permeabilidade relative do óleo	1
Viscosidade da água	0.72
Viscosidade do óleo	1.63
Pressão inicial do reservatório (psi)	1250

O modelo descrito pode ser observado na Fig. 11, sendo uma variação do modelo utilizado por Cao et al, 2014. Outras características do modelo podem ser encontradas em Cao et al., (2014).

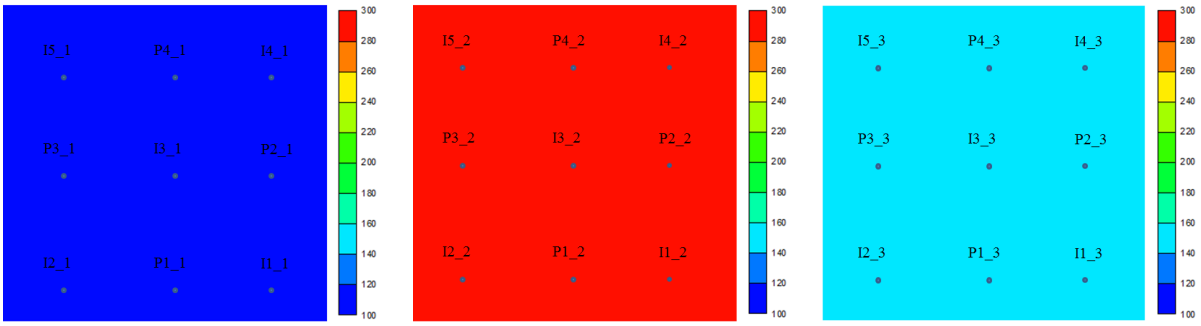
Figura 11 - Caso 1 e mapa das permeabilidades.



Fonte: A autora

A Fig. 12 a seguir mostra o perfil de cada camada e suas respectivas permeabilidades. Podemos observar que as camadas tem diferentes permeabilidades entre si, porém, ao longo das camadas, a permeabilidade é homogênea.

Figura 12 - Permeabilidade por camadas caso 1: (a) primeira camada. (b) Segunda camada. (c) Terceira camada.



(a) $K = 100md$ (b) $K = 300md$ (c) $K = 150md$

Fonte: A autora

Para o cálculo dos parâmetros utilizando os modelos CRM-ML e CRM-MLMTC, é necessário ter disponível os dados das vazões de injeção por camada. Além disso, para o

cálculo utilizando o CRM-MLMTC, as vazões iniciais dos produtores devem ser também conhecidas em cada camada.

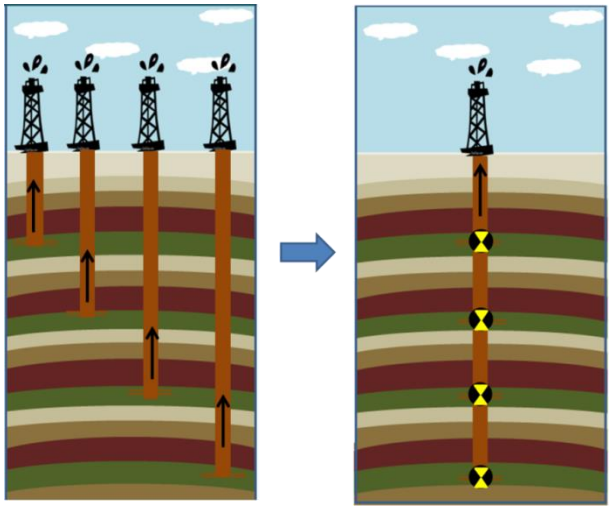
No campo real, para ser possível ter disponível essas informações, seria necessário trabalhar com poços inteligentes, que são poços não convencionais que tem um sistema de sensores de monitoramento em tempo real de fluxo, pressão e temperatura.

Os poços inteligentes tem também a habilidade de isolar e controlar zonas individuais do reservatório (segmentação do poço), e possuem válvulas que permitem o acesso as informações por camada do reservatório. Dessa forma, é possível ter acesso às informações das vazões de injeção, BHP e vazões iniciais de produção para cada camada do reservatório.

Para reproduzir o poço inteligente no simulador, foram utilizadas múltiplas completações com múltiplos poços em uma mesma localização areal, ou seja, considerou-se a presença de vários tubos (um tubo por camada) localizados em um mesmo poço, cada um completado em uma única camada do reservatório, de forma a representar cada trecho de um poço inteligente.

A formulação com essa consideração apresenta uma vantagem, pois os estudos de comportamento de reservatórios com completação "convencional" já é bem desenvolvida, o que permite um controle mais seguro (no que se refere à interação poço/reservatório) nos estudos realizados para definição do comportamento de um dado reservatório.

Figura 13 - Produção de diversas zonas a partir de um mesmo poço completado em todas as camadas, com válvulas de controle.



Fonte: A autora

O caso 1 foi utilizado como base para a inclusão de diferentes caraterísticas geológicas, com o objetivo de criar derivações do modelo com diferentes heterogeneidades. Esses novos modelos foram o objeto de estudo e validação das estratégias propostas, pois sendo conhecidas suas características é possível avaliar a coerência dos valores dos parâmetros calculados em relação à heterogeneidade imposta no modelo. Além disso, os valores dos parâmetros obtidos também nos indica a sensibilidade de cada estratégia de capturar essas heterogeneidades.

A primeira modificação no caso 1 foi a inclusão de dois canais de alta permeabilidade (8.000 mD), a segunda, foi a imposição de uma falha selante, cujas células que a modelam tem permeabilidade, transmissibilidade e porosidade nulas. A terceira e última foi a inclusão simultânea dos canais de alta permeabilidade e da falha selante. Cada um dos casos será detalhado nos itens a, b e c a seguir e terão seus resultados discutidos posteriormente.

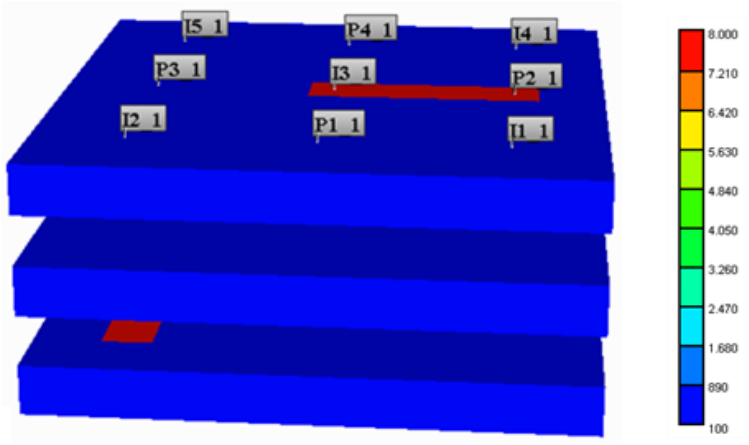
a) Caso 1 com canais de alta permeabilidade

Os reservatórios de petróleo apresentam heterogeneidades em todas as escalas. Na escala de grãos individuais, pode haver grande variação nos tamanhos de grãos,

proporcionando ampla distribuição de volumes vazios e interconexões, que podem formar canais.

Para avaliar os efeitos dessa heterogeneidade no cálculo das conectividades, foram incluídos no modelo dois canais de alta permeabilidade: 8000 mD. Um canal está localizado entre o injetor I-3 e o produtor P-2, na primeira camada e o outro entre o produtor P-3 e o injetor I-2 na terceira camada, como pode ser observado nas Fig. 14 e 15.

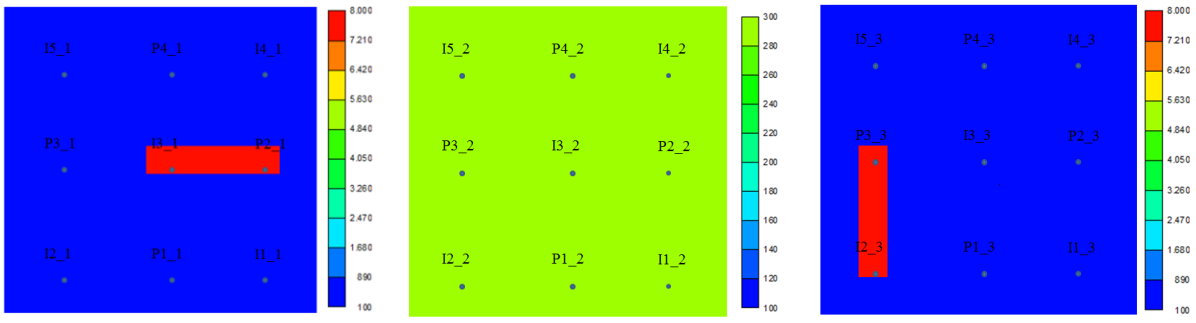
Figura 14 - Caso 1 com canais de alta permeabilidade e mapa das permeabilidades.



Fonte: A autora

A figura 15 mostra o perfil de cada camada, onde se pode observar com clareza a presença dos canais de alta permeabilidade na primeira e na terceira camada.

Figura 15 - Permeabilidade por camada, caso 1 com canais de alta permeabilidade: (a) primeira camada, (b) segunda camada e (c) terceira camada.



(a) (b) (c)

Fonte: A autora

Nesse modelo, deve-se observar altas conectividades entre os poços P-2 e I-3 na primeira camada assim como entre os poços P-3 e I-2 na terceira camada, devido à presença dos canais. O CRM-ML e CRM-MLMTC, através de seus parâmetros por camada, devem capturar, com mais acurácia que o CRMP essa heterogeneidade, já que este último calcula os parâmetros considerando o reservatório compactado em uma única camada.

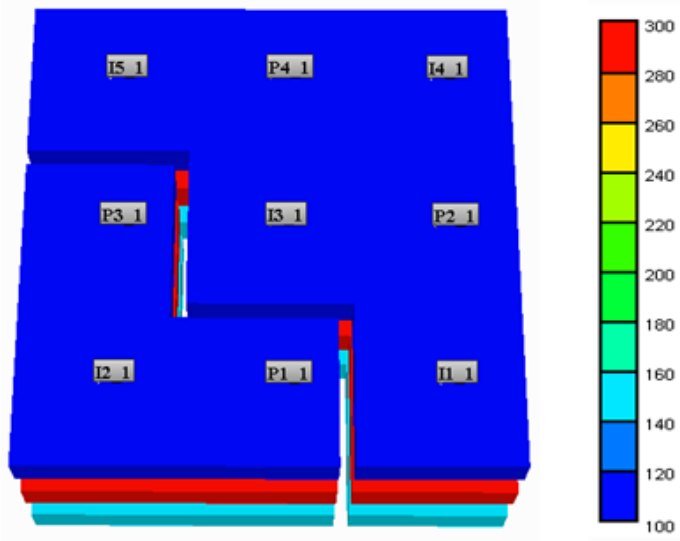
b) Caso 1 com falha selante

Neste exemplo, foi adicionada ao modelo sintético uma falha selante com permeabilidade, transmissibilidade e porosidade nulas, atravessando verticalmente as três camadas do reservatório, para avaliar também o efeito dessa heterogeneidade no fluxo dos fluidos e nos parâmetros calculados.

Nos reservatórios de petróleo reais, as falhas são criadas por tensões na rocha e podem medir de alguns centímetros até centenas de metros. As falhas podem ter uma capacidade significativamente maior ou menor de transmitir fluidos do que as rochas ao seu redor, dependendo de como o espaço vazio for preenchido (material de argila, por exemplo, por ser muito fino, torna a falha impermeável).

As Fig. 16 e 17 a seguir, mostram a presença da falha selante cortando transversalmente as três camadas do reservatório.

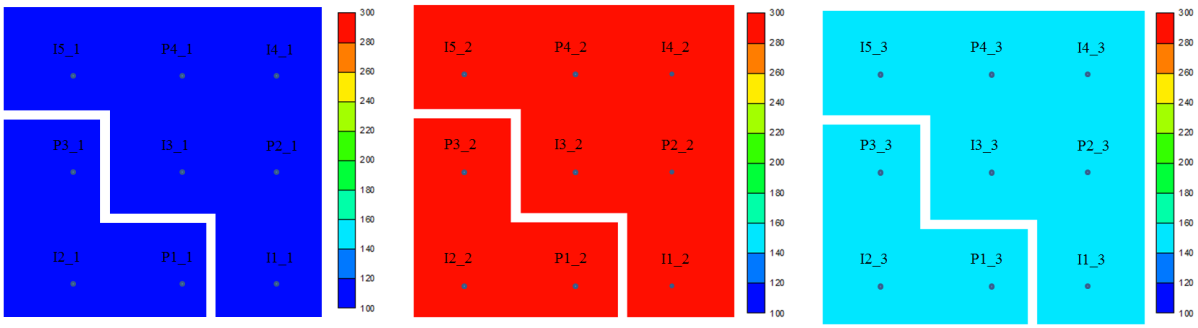
Figura 16 - Caso 1 com falha selante e mapa de permeabilidades.



Fonte: A autora

Analisando o perfil de cada camada, observa-se a presença da falha em cada uma delas:

Figura 17 - Permeabilidade por camadas caso 1 com falha selante: (a) primeira camada, (b) segunda camada e (c) terceira camada.



(a) (b) (c)

Fonte: A autora

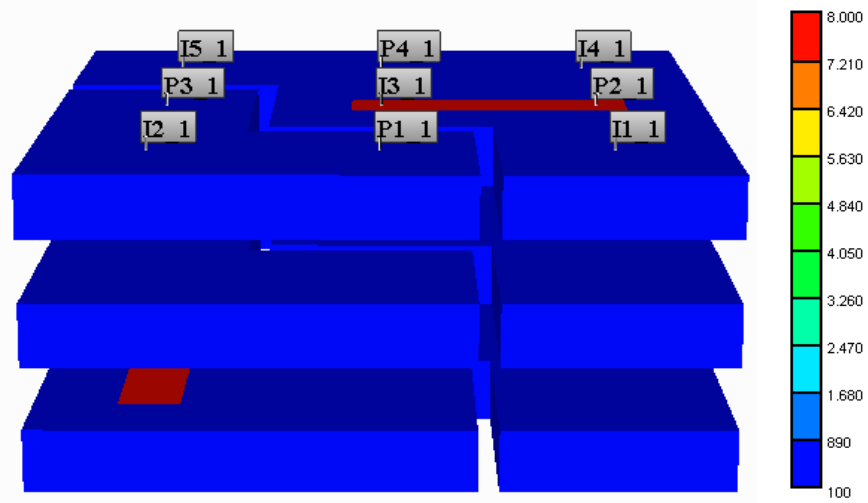
Nesse modelo, deve-se observar conectividades nulas entre os pares de poços injetor/produtor que se encontram em lados opostos da falha. Ou seja, o injetor I-2, localizado

do lado esquerdo da falha, deverá ter forte influência nos produtores P-1 e P-3, localizados também do lado esquerdo da falha, porém, não deve influenciar o fluxo dos produtores P-2 e P-5, que estão do lado oposto da falha. Por sua vez, os injetores I-3, I-4 e I-5, localizados do lado direito da falha deverão ter forte influencia nos produtores P-2 e P-4, localizados também do lado direito da falha. Já os produtores P-1 e P-3, localizados do lado esquerdo da falha, ou seja, oposto a esses últimos injetores, não devem apresentar conectividade significativa com os mesmos.

c) Caso 1 com canais e falha selante

Neste caso, foi adicionado ao caso 1, simultaneamente, os dois canais de alta permeabilidade e a falha selante, descritos nos exemplos a e b, respectivamente, como mostram as Fig. 18 e 19.

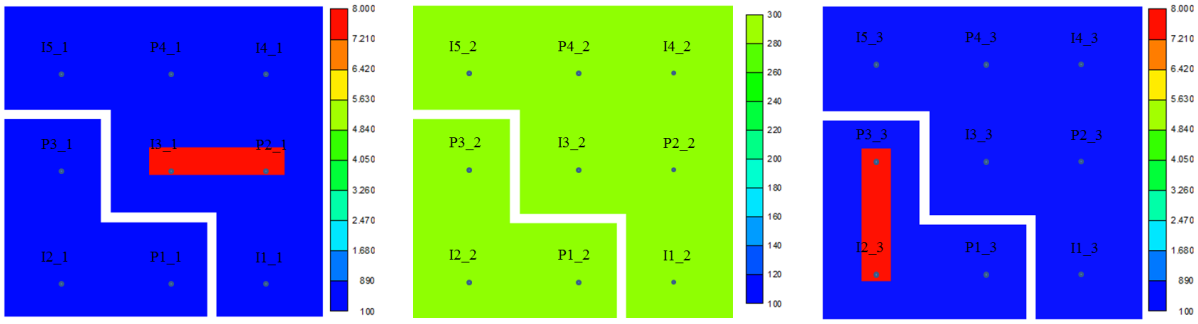
Figura 18 - Caso 1 com falha selante e mapa de permeabilidade.



Fonte: A autora

A Fig. 19 mostra o perfil de cada camada, onde se observa a presença da falha selante e dos canais de alta permeabilidade:

Figura 19 - Permeabilidade por camadas caso 1 com canais de alta permeabilidade: (a) primeira camada, (b) segunda camada e (c) terceira camada.



(a) (b) (c)

Fonte: A autora

Nesse modelo, deve-se observar os efeitos das duas heterogeneidades impostas simultaneamente, ou seja, as altas conectividades entre os poços P-2 e I-3 na camada 1 e entre

os poços P-3 e I-2 na camada 3, devido à presença dos canais, e conectividades nulas entre os poços injetores que estão de um lado da falha e os poços produtores localizados do lado oposto da mesma, como já analisado nos exemplos a e b respectivamente.

5.1.1 Resultados do Cálculo dos Parâmetros dos Exemplos a, b, c

Para cada uma das variações do Caso 1 descritos nas letras a, b e c acima, foram calculados os parâmetros do CRM através dos modelos CRMP, CRM-ML e CRM-MLMTC, para avaliar os efeitos das suas respectivas heterogeneidades nos valores obtidos para as conectividades em cada um dos modelos.

Utilizando o simulador IMEX, da CMG, foi realizada uma simulação de duração de 20 anos, para cada um dos três exemplos a, b e c, na qual todos os poços foram mantidos ativos ao longo da mesma. Para cada caso, utilizando os dados dessa mesma simulação, foram calculados os parâmetros dos modelos em diferentes condições:

- Cálculo considerando os dados do BHP e vazão inicial dos produtores conhecidos;
- Cálculo considerando os dados do BHP desconhecidos e vazão inicial dos produtores conhecida;
- Cálculo considerando os dados do BHP conhecidos e a vazão inicial dos produtores desconhecida;

Outra simulação foi realizada, também para cada um dos exemplos, com duração de 20 anos, porém envolvendo o fechamento e a abertura de poços. Os parâmetros do CRM foram calculados, para cada um dos exemplos, através de cada um dos modelos CRMP, CRM-ML e CRM-MLMTC. Esse foi mais um estudo utilizando os modelos a, b e c, uma quarta condição para o cálculo dos parâmetros:

- Cálculo envolvendo abertura e fechamento de poços produtores;

Serão mostrados e discutidos a seguir os resultados obtidos para os parâmetros, em cada uma dessas situações, dos três exemplos estudados.

Os resultados foram comparados entre si, através dos valores obtidos para as conectividades e também pela análise do gráfico de ajuste das curvas das vazões líquidas de produção observada e calculada (obtidos através de simulação).

5.1.1.1 Cálculo considerando os dados do BHP e vazão inicial dos produtores conhecidos

Esse primeiro estudo foi realizado com o objetivo de avaliar o desempenho dos modelos implementados em uma situação em que todos os dados presentes na equação analítica dos modelos CRM são conhecidos. Os dados das vazões de injeção e produção são a base para o desenvolvimento do modelo, porém, é possível calcular os parâmetros mesmo que não se tenha disponível os dados do BHP ou da vazão inicial dos produtores, como será visto a seguir. Neste caso, porém, considerou-se conhecidos os dados do BHP de todos os produtores ao longo do tempo de produção do reservatório e também as vazões iniciais dos produtores, total e por camada.

Conhecendo o BHP, foi possível considerar a sua variação na equação analítica, e dessa forma é possível realizar o cálculo de todos os parâmetros do modelo. Pode-se observar na equação (2.16) que o parâmetro índice de produtividade (J_j) encontra-se em um termo multiplicado pela variação do BHP. Sendo o BHP desconhecido faz-se a consideração que o mesmo é constante, tendo então variação nula e consequentemente o termo torna-se nulo, impossibilitando calcular o (J_j).

Os modelos CRM-ML e CRM-MLMTC devem capturar com mais acurácia que o CRMP as heterogeneidades nas camadas do reservatório, já que os dois últimos modelos calculam os parâmetros para cada uma delas, principalmente o CRM-MLMTC, que calcula todos os parâmetros para cada camada.

A seguir, serão apresentados os resultados dos três exemplos a, b e c, para a condição de BHP e vazão inicial sendo dados conhecidos.

a) Resultados do Caso 1 com canais de alta permeabilidade

Os resultados dos parâmetros calculados para o caso 1 com canais de alta permeabilidade, conhecidos os dados do BHP e vazões iniciais dos produtores, para as três estratégias do CRM, podem ser encontrados no Apêndice A. Nas tabelas 4 e 5 encontram-se as conectividades entre os poços I-3 e P-2 e I-2 e P-3, os quais são ligados pelos canais de alta permeabilidade, na primeira e terceira camada, respectivamente. Para os modelos CRM-ML e CRM-MLMTC estão os valores por camada e suas médias.

Tabela 4 - Conectividades entre os poços P-2 e I-3. Em destaque as conectividades na camada 1, onde há o canal de alta permeabilidade entre este par de poços.

		CRMP	CRMP-ML		CRMP-MLMTC	
Poço	**Camada**	**I-3**	**I-3**	**I-3 - Média**	**I-3**	**I-3 - Média**
	$\alpha = 1$		0,8755		0,9219	
P-2	$\alpha = 2$	**0,4080**	0,2680	**0,4120**	0,2979	**0,4424**
	$\alpha = 3$		0,0924		0,1073	

Tabela 5 - Conectividades entre os poços P-3 e I-2. Em destaque as conectividades na camada 3, onde há o canal de alta permeabilidade entre este par de poços.

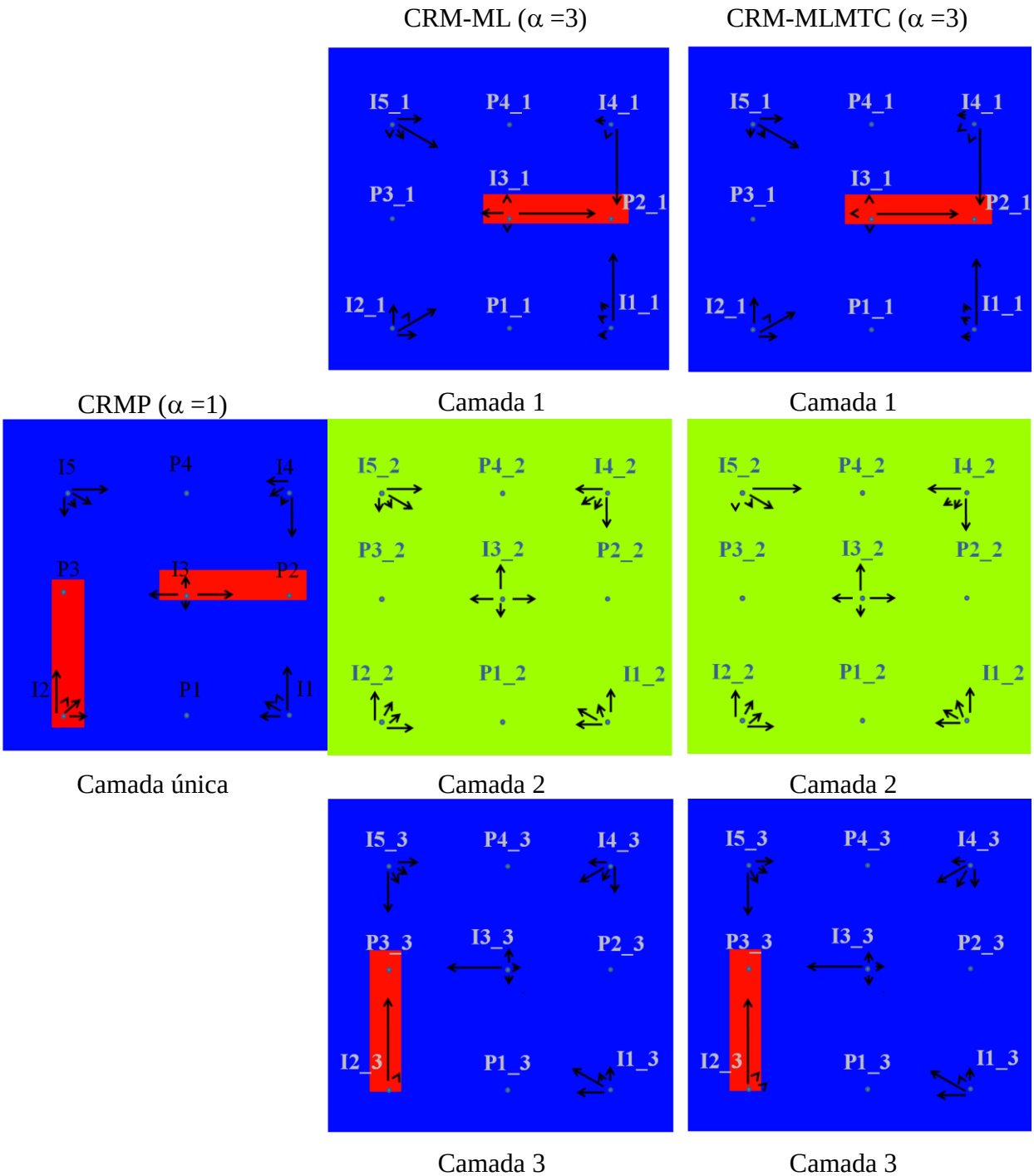
		CRMP	CRMP-ML		CRMP-MLMTC	
Poço	**Camada**	**I-2**	**I-2**	**I-2 - Média**	**I-2**	**I-2 - Média**
	$\alpha = 1$		0,2348		0,2981	
P-3	$\alpha = 2$	**0,5000**	0,3367	**0,5071**	0,3141	**0,5297**
	$\alpha = 3$		0,9498		0,9769	

Analisando as tabelas 4 e 5, pode-se verificar que, como esperado, os resultados das conectividades entre os poços I-3 e P-2 na primeira camada assim como entre I-2 e P-3 na terceira camada, obtidos pelas estratégias CRM-ML e CRM-MLMTC, foram altas. Na tabela 4 pode-se ver que a conectividade na camada 1 entre o par de poços P-2 e I-3 teve como resultado 0,8755 para o CRM-ML e 0,9219 para o CRM-MLMTC, que são valores altos já que o somatório de todas as conectividades é no máximo 1.

Pode-se observar também que os valores obtidos para o CRMP, que são únicos para os pares produtor/injetor, pois não divide o reservatório em camadas, se aproximam da média dos resultados obtidos por camada das outras duas estratégias.

Na Fig. 20 podem-se observar as conectividades entre os pares de poços produtores/injetores representadas por setas, as quais tem sua origem no injetor e apontam para o produtor. O tamanho das setas é proporcional aos valores das conectividades que as mesmas representam.

Figura 20 - Conectividades entre os pares de poços produtores/injetores, caso 1 com canais de alta permeabilidade.



Fonte: A autora

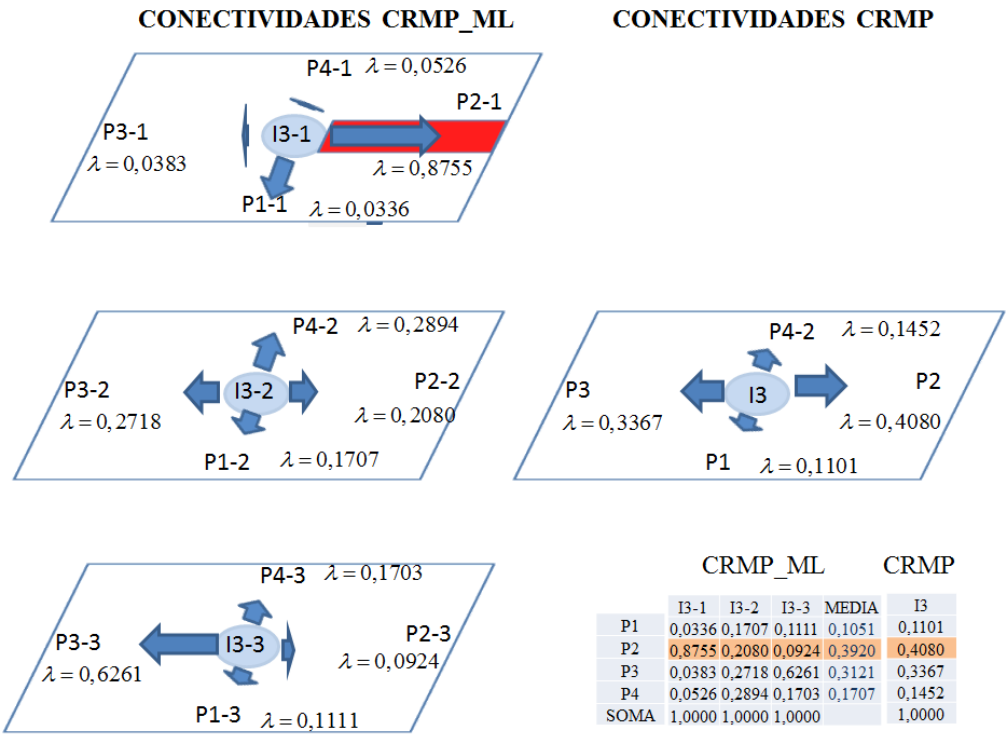
Através da Fig. 20, é possível comparar os resultados das conectividades para cada um dos modelos do CRM. Pode-se observar que os resultados das conectividades obtidos através da estratégia CRM-ML e CRM-MLMTC são muito próximos e pode-se perceber que elas capturam sensivelmente a alta conectividade existente entre os poços I-3 e P-2 na primeira camada assim como entre I-2 e P-3 na terceira camada, devido à presença do canal. Isso pode ser visto pelo tamanho da seta que conecta esses pares injetor/produtor, que é bem maior que as outras, representando, portanto, uma alta conectividade entre esses pares de poços.

Ainda analisando a Fig. 20, pode-se ver que essa alta conectividade entre I-3 e P-2, assim como entre I-2 e P-3, na primeira e terceira camada, respectivamente, já não mais ocorre nas outras duas camadas, ou seja, o comportamento do fluxo de uma camada não interfere na outra. Portanto, os métodos mostram que a estratégia de divisão em camadas consegue detectar com precisão essa heterogeneidade entre as camadas.

Percebe-se ainda que o canal exerce também uma grande influência nos poços vizinhos. Como exemplo, analisando as conectividades de I-1 e I-4 em relação a P-2, verifica-se que o canal atrai o fluxo dos mesmos em direção a este produtor, pois, observa-se um valor alto de conectividade entre esses poços injetores e P-2 na primeira camada, o que não ocorre nas outras duas camadas, onde não existem canais.

A Fig. 21, a seguir, mostra as conectividades entre o injetor I-3 e os produtores. Pode-se observar, tanto visualmente pelo tamanho das setas, como pelos valores numéricos, que as conectividades obtidas através do CRMP são aproximadamente a média das conectividades das três camadas obtidas pelo CRM-ML.

Figura 21 - Conectividades entre o injetor I-3 e os produtores.



CRMP_ML

	I3-1	I3-2	I3-3	MEDIA
P1	0,0336	0,1707	0,1111	0,1051
P2	0,8755	0,2080	0,0924	0,3920
P3	0,0383	0,2718	0,6261	0,3121
P4	0,0526	0,2894	0,1703	0,1707
SOMA	1,0000	1,0000	1,0000	

CRMP

I3
0,1101
0,4080
0,3367
0,1452
1,0000

Fonte: A autora

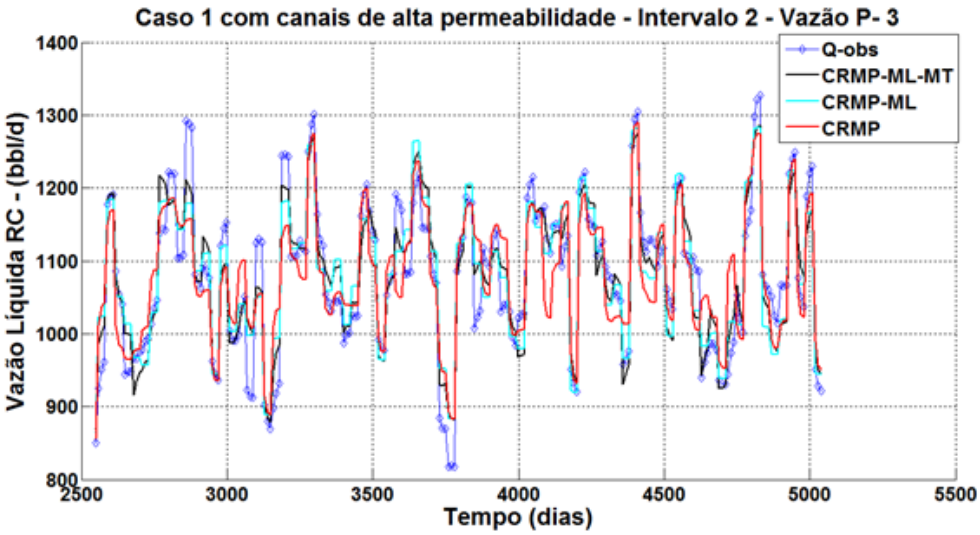
Como o CRMP considera o reservatório como uma única camada, seus resultados irão também refletir uma média das características geológicas que irão compor essa única camada, enquanto o CRM-ML e o CRM-MLMTC, que dividem o reservatório em camadas considerando suas diferenças geológicas, obtêm os parâmetros para cada uma de acordo com suas características. Portanto, esse aprimoramento na estratégia nos fornece informações importantes sobre as características geológicas do reservatório.

O CRMP tem mostrado bons resultados quando o volume drenado pelo produtor é homogêneo. Como nesse caso temos duas camadas com dois canais de alta permeabilidade, isso faz com que esse volume não seja homogêneo para todo o poço. De fato, pode-se observar que essa heterogeneidade compromete os resultados obtidos pelo CRMP, pois o mesmo não as detecta. Já o CRM-ML e o CRM-MLMTC conseguem captar essa heterogeneidade, resultando em valores mais precisos para os parâmetros.

O efeito do aprimoramento da estratégia na determinação dos parâmetros é observado no gráfico de ajuste das curvas das vazões líquidas de produção observadas e calculadas.

Foram escolhidos para análise os gráficos dos poços P-3 e P-4. O poço P-3 por ter uma heterogeneidade em uma de suas camadas, que é o canal entre o mesmo e o I-2, e o poço P-4, por ser diretamente vizinho de P-3. As Fig. 22 e 23 mostram o ajuste das curvas para o poço P-3, e as Fig. 24 e 25 para o poço P-4.

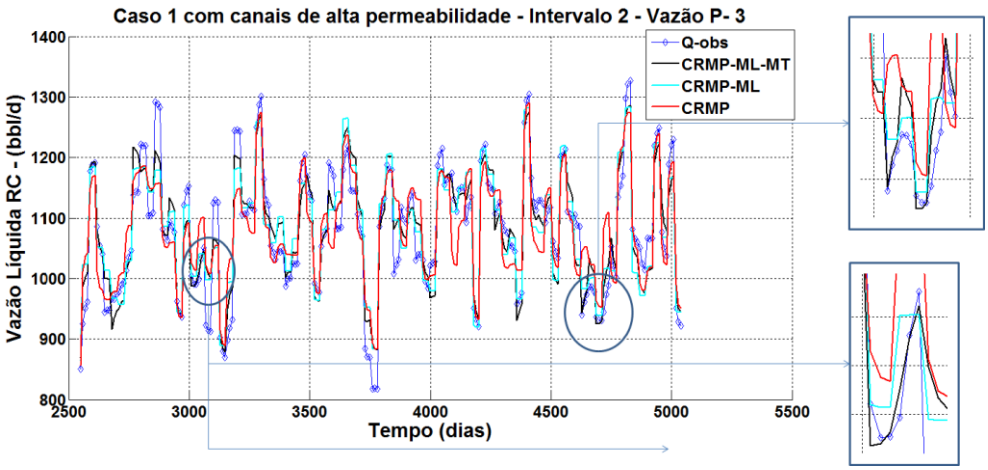
Figura 22 - Ajuste entre as curvas das vazões de produção calculada e observada para o poço P-3



Fonte: A autora

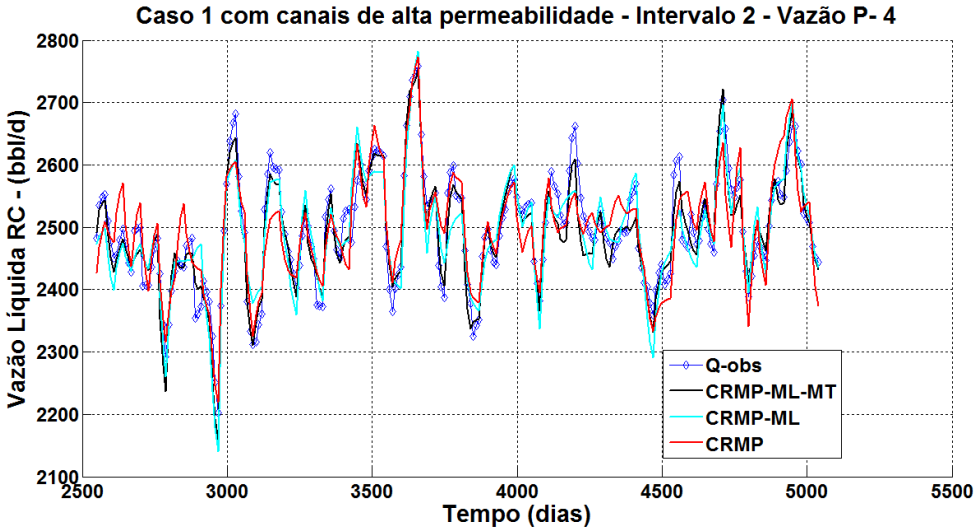
Ampliando o gráfico, pode-se ver com clareza o ajuste entre os dados calculados, através dos três modelos CRM, e os dados observados.

Figura 23 - Gráfico da figura 22 ampliado.



Fonte: A autora

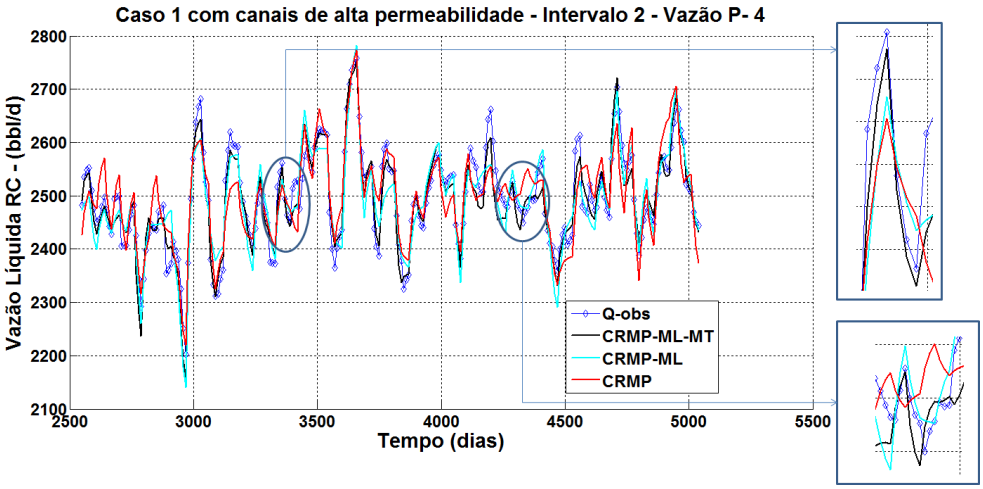
Figura 24 - Ajuste entre as curvas das vazões de produção calculada e observada para o poço P-4



Fonte: A autora

Ampliando o gráfico de P-4, pode-se também observar com clareza o ajuste entre os dados calculados, através dos três modelos CRM, e os dados observados.

Figura 25 - Gráfico da figura 24 ampliado.



Fonte: A autora

Analisando os gráficos, pode-se perceber que as curvas das vazões líquidas calculadas pelo CRM-ML e pelo CRM-MLMT se ajustam muito melhor a curva das vazões líquidas dos dados simulados do que a curva calculada pelo CRMP. Isso mostra que de fato as estratégias que calculam os parâmetros por camada conseguem se aproximar com mais precisão ao comportamento real do reservatório.

As estratégias CRM-ML e CRM-MLMTC tem suas curvas muito próximas no gráfico entre si assim como da curva da vazão observada , o que indica que as conectividades tem um impacto maior no cálculo da vazão que a constante de tempo assim como o índice de produtividade e, portanto, variar as conectividades por camada mantendo constantes estes outros parâmetros, como faz o CRM-ML, já retorna resultados bem mais precisos que o CRMP, com menos variáveis que o CRM-MLMTC.

Para o poço P-3, que tem o canal ligado diretamente a ele, a curva do CRM-MLMTC é a que entre as três estratégias tem o melhor ajuste e, além disso, mesmo quando a sua curva se distancia da curva dos dados observados, ela está sempre acompanhando a tendência da mesma, o que não observamos com as curvas do CRMP e CRM-ML. Portanto, para esse poço que apresenta heterogeneidade entre as camadas em que está completado, o CRM-MLMTC mostrou ter os resultados para os parâmetros calculados que melhor se ajustam aos dados observados.

b) Resultados do Caso 1 com falha selante

Os resultados dos parâmetros calculados para o caso 1 com falha selante, para as três estratégias do CRM, podem ser encontrados no Apêndice B. Nas tabelas 6 e 7 encontram-se as conectividades entre os poços P-3 e I-2 que estão localizados no mesmo lado da falha e entre P-3 e I-3, localizados em lados opostos da falha, respectivamente.

Tabela 6 - Conectividades entre os poços P-3 e I-2, localizados em lados opostos da falha.

		CRMP	CRMP-ML		CRMP-MLMTC	
Poço	**Camada**	**I-2**	**I-2**	**I-2 - Média**	**I-2**	**I-2 - Média**
	$\alpha = 1$		0,4140		0,4683	
P-3	$\alpha = 2$	0,4644	0,4962	0,4231	0,5027	0,4560
	$\alpha = 3$		0,3592		0,3970	

Tabela 7 - Conectividades entre os poços P-3 e I-3, localizados do mesmo lado da falha.

		CRMP	CRMP-ML		CRMP-MLMTC	
Poço	**Camada**	**I-3**	**I-3**	**I-3 - Média**	**I-3**	**I-3 - Média**
	$\alpha = 1$		0,0000		0,0000	
P-3	$\alpha = 2$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$\alpha = 3$		0,0000		0,0000	

Observando a tabela. 7 pode-se perceber que as conectividades entre os poços P-3 e I-3, localizados em lados opostos a falha selante, são nulas, ou seja, devido à falha selante, o injetor I-3 não exerce influencia sobre o fluxo de P-3, como era esperado.

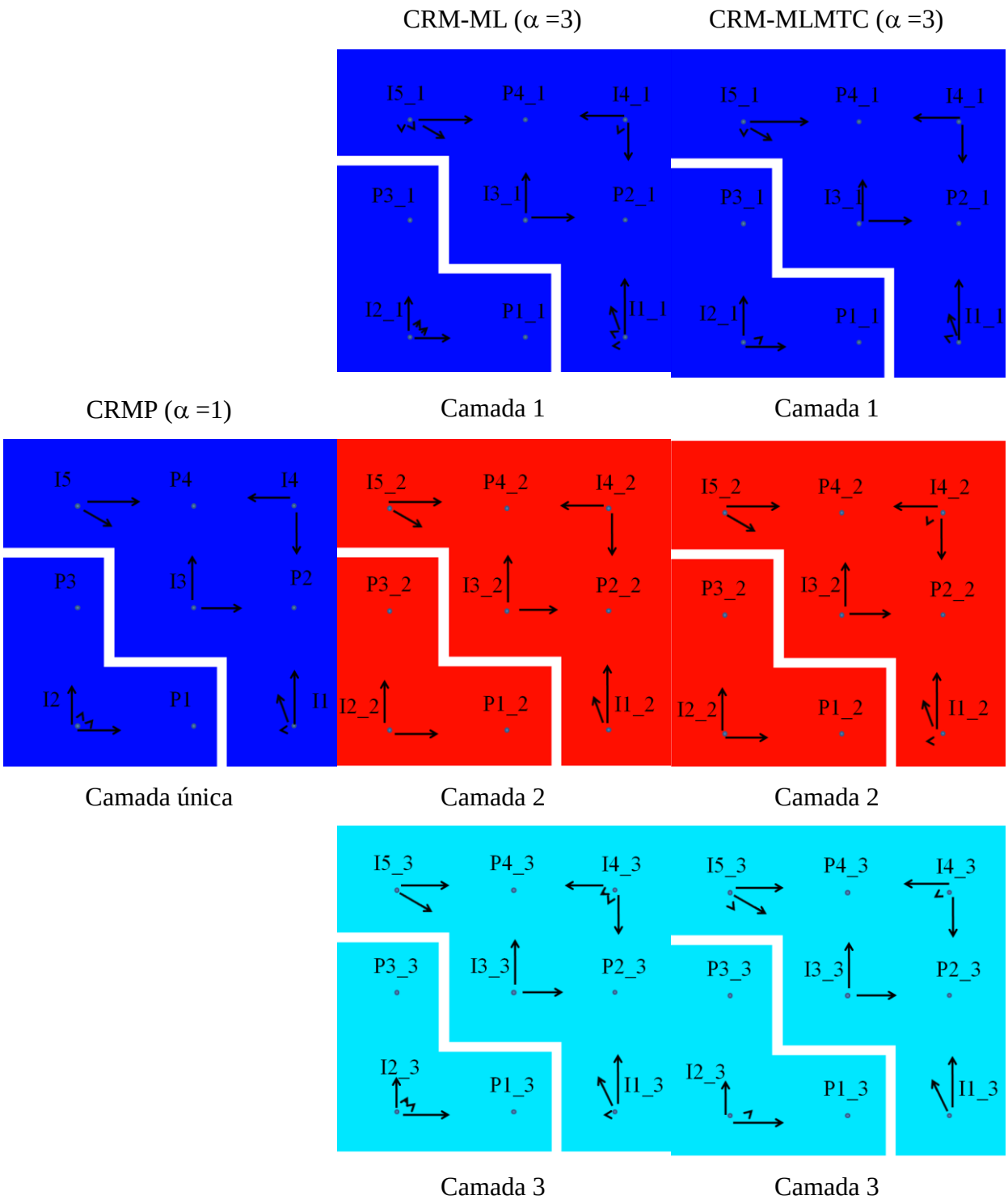
Por outro lado, as conectividades entre o injetor I-2 e o produtor P-3, para os três modelos CRM, tem média em torno de 0,4, o que é um resultado coerente com as características do modelo já que esses dois poços estão do mesmo lado da falha onde existe apenas mais um produtor, P-1. Sendo o modelo simétrico, a distância de I-2 para os dois produtores é a mesma, e, portanto, as conectividades entre I-2 e os dois poços produtores, em teoria, seriam as mesmas, 0,5 para com cada um. Logo, o valor encontrado está próximo ao valor esperado.

Assim como no exemplo anterior, o caso 1 com canais de alta permeabilidade, os resultados das conectividades do CRMP estão próximos à média dos resultados das conectividades nas camadas, calculados pelas estratégias CRM-ML e CRM-MLMT.

A Fig. 26 mostra a comparação das conectividades para as três estratégias através do gráfico com as setas. Neste modelo com a falha selante, observa-se que, para o mesmo modelo CRM, os resultados das conectividades nas camadas não tem uma variação tão expressiva quanto no exemplo com os canais de alta permeabilidade.

Diferente dos canais de alta permeabilidade, que conectam um par de poços produtor/injetor apenas em uma das camadas do modelo, a falha selante é vertical e está igualmente presente em todas as camadas. Portanto, apesar de ser uma heterogeneidade no modelo, ela não gera uma heterogeneidade tão acentuada entre as camadas.

Figura 26 - Conectividades entre os pares de poços produtores/injetores, caso 1 com canais com falha selante.

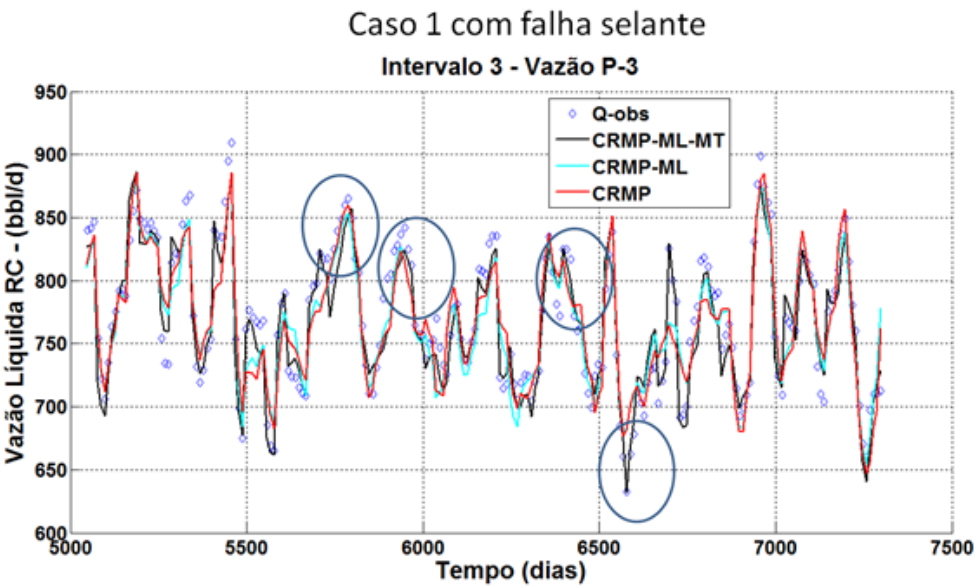


Fonte: A autora

Observando a Fig. 26 pode-se ver que I-2 apresenta influência nos produtores de P-1 e P-3, que estão do mesmo lado da falha que ele. Já em relação a P-4 e P-2, I-2 apresenta conectividades praticamente nulas, devido à falha selante que não permite que o fluxo de I-2 chegue a esses produtores. Pode-se observar o mesmo para os poços que estão do lado direito da falha, ou seja, os injetores I-1, I-3, I-4 e I-5, os quais tem influência nos poços produtores que estão do mesmo lado que eles da falha, ou seja, P-2 e P-4. Já P-1 e P-3 tem conectividades praticamente nulas com esses últimos injetores.

Nas Fig. 27 e 28 e Fig. 29 e 30, pode-se analisar o ajuste das curvas de vazão de produção líquida calculada pelas três estratégias do CRM e a vazão de produção líquida dos dados observados. Foram escolhidos para serem analisados os poços P-3 e P-4, para avaliar o comportamento dos resultados de poços em lados opostos a falha.

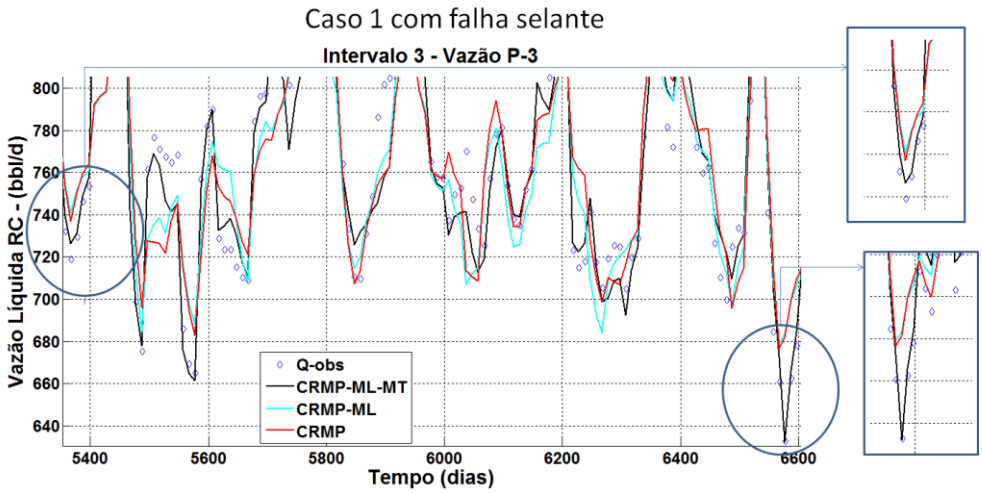
Figura 27 - Ajuste entre as curvas das vazões de produção calculada e observada para o poço P-3.



Fonte: A autora

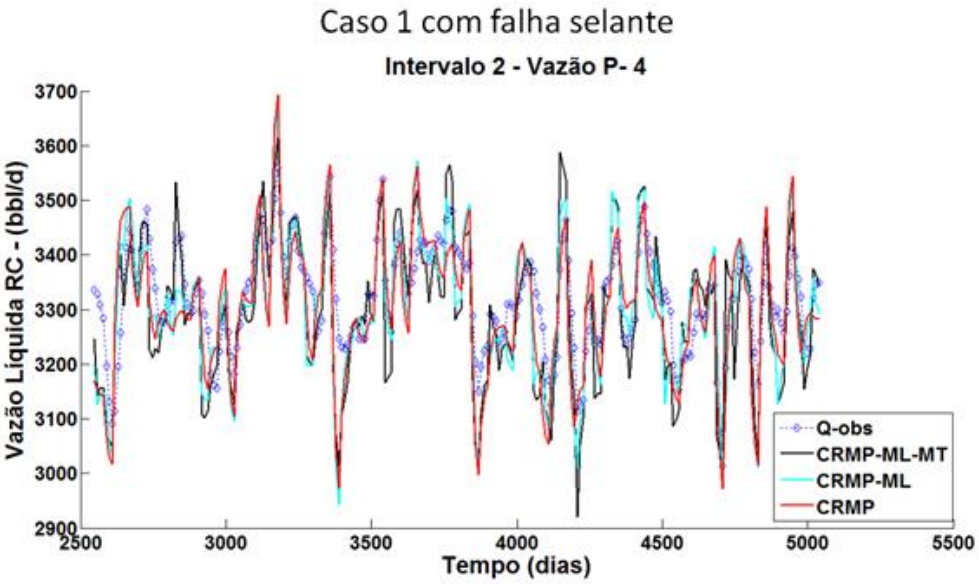
Ampliando o gráfico da vazão de P-3, pode-se observar melhor o ajuste dos modelos em relação aos dados observados.

Figura 28 - Gráfico ampliado da figura 27.



Fonte: A autora

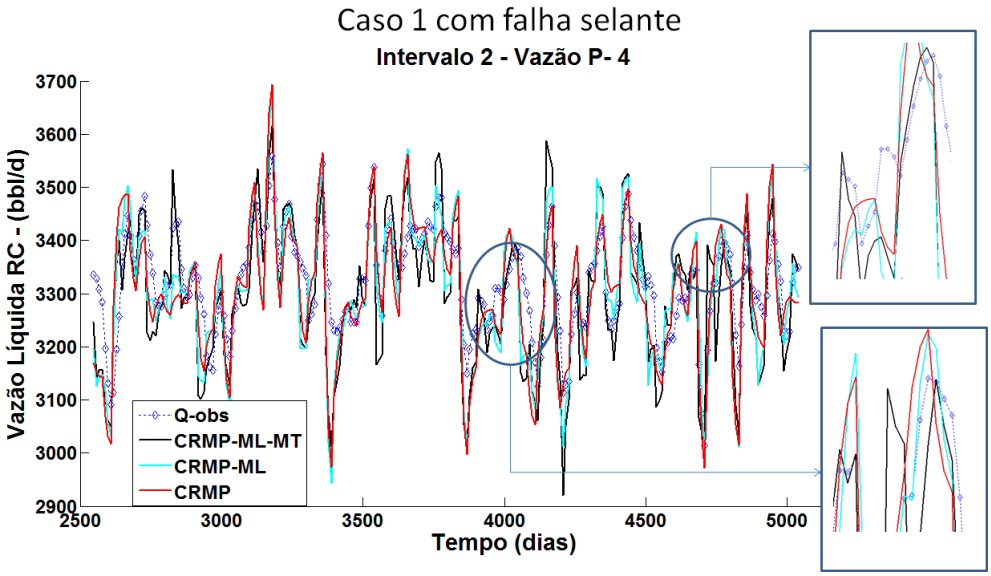
Figura 29 - Ajuste entre as curvas das vazões de produção calculada e observada para o poço P-4.



Fonte: A autora

Novamente ampliando o gráfico, dessa vez de P-4, pode-se fazer uma análise do ajuste das curvas calculadas e observadas na Fig. 30.

Figura 30 - Gráfico da figura 29 ampliado.



Fonte: A autora

Analisando os gráficos dos dois poços produtores escolhidos, pode-se observar que apesar dos resultados obtidos para as conectividades nas camadas, calculados pelo CRM-ML e CRM-MLMTC, serem bastante próximos, assim como a média das camadas e o resultado do CRMP, as curvas dos resultados calculados pelo CRM-ML e CRM-MLMTC se ajustam melhor aos dados observados do que a curva dos dados calculados pelo CRMP.

Isso ocorre porque as permeabilidades das camadas são diferentes, e o modelo CRM-ML e CRM-MLMTC, que calculam os parâmetros por camadas, conseguem detectar essa heterogeneidade com mais precisão que o modelo CRMP. Ainda que as permeabilidades entre as camadas não variem de forma brusca, como no caso do canal em que a permeabilidade do mesmo é na ordem de 10 vezes maior que a permeabilidade da camada, a diferença entre elas já provoca diferentes comportamentos do fluxo dos fluidos em cada uma das camadas.

Portanto, pode-se perceber que os modelos CRM-ML e CRM-MLMTC são muito mais sensível às heterogeneidades existentes entre as camadas, aproximando ainda mais o modelo ao comportamento real do fluxo dos fluidos no reservatório.

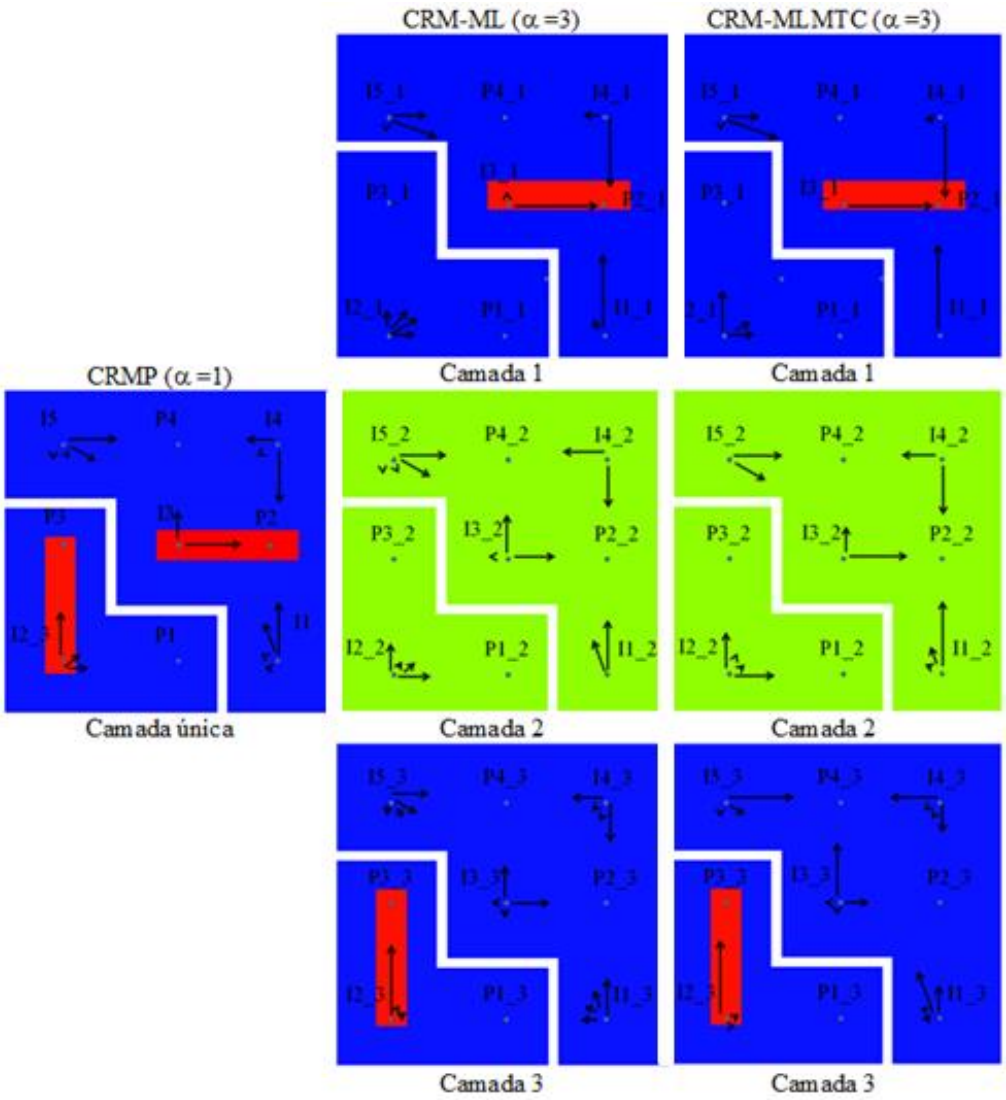
Assim como no modelo anterior, a curva do modelo CRM-MLMTC foi a que teve o melhor ajuste em relação às outras duas estratégias, seguido pelo CRM-ML, que também apresentou um bom ajuste e tem a vantagem de ter um número menor de variáveis. O ajuste do modelo CRMP foi o que teve os maiores desvios.

c) Resultados do Caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante

Os resultados dos parâmetros calculados para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, para as três estratégias do CRM, podem ser encontrados no Apêndice C.

A Fig. 31 mostra a comparação das conectividades, através do gráfico com as setas, para as três estratégias do CRM. Nesse modelo estão presentes, simultaneamente, as duas heterogeneidades dos modelos anteriores, ou seja, canais de alta permeabilidade e falha selante.

Figura 31 - Conectividades entre os pares de poços produtores/injetores, caso 1 com canais com falha selante.



Fonte: A autora

Em relação aos canais, as mesmas análises já realizadas no caso 1 com canais de alta permeabilidade, podem ser feitas neste caso. Portanto, novamente observam-se as altas conectividades entre os pares de poços P-2 e I-3 na primeira camada e também entre I-2 e P-3 na terceira camada, devido à presença do canal entre eles.

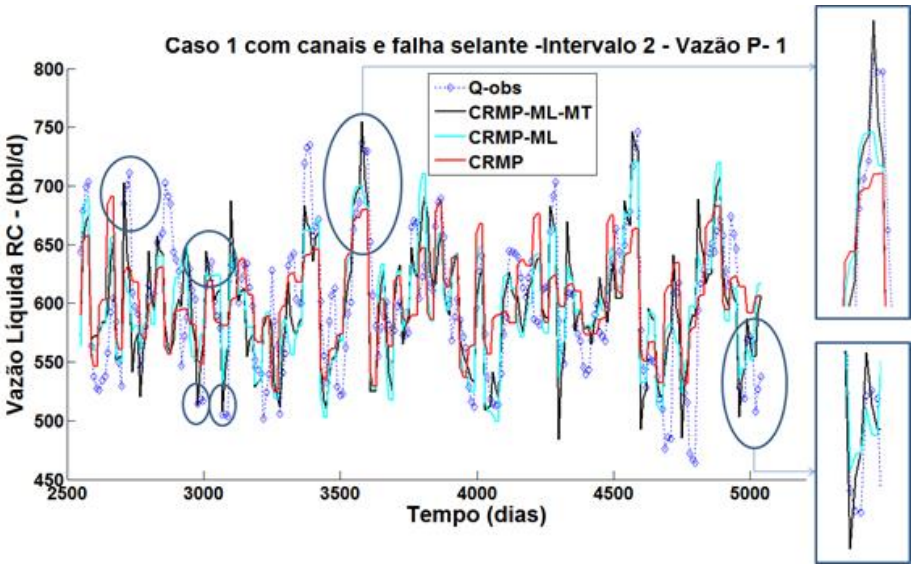
Além disso, observa-se novamente a influência dos canais nos injetores vizinhos, os quais tem grande parte do seu fluxo direcionado ao produtor conectado ao canal. Na camada 1

pode-se ver que os injetores I-1 e I-4, mesmo não estando conectados a P-2 por canal, tem uma alta conectividade com mesmo, devido à presença do canal entre P-2 e I-3. Na camada 2 as conectividades já são menores, diminuindo ainda mais na camada 3, que já está mais distante no canal.

Mais uma vez, verifica-se que os resultados das conectividades para o CRM-ML e para o CRM-MLMTC são próximos, e que a média das conectividades das camadas calculadas por esses dois modelos se aproximam aos valores das conectividades calculadas pelo CRMP.

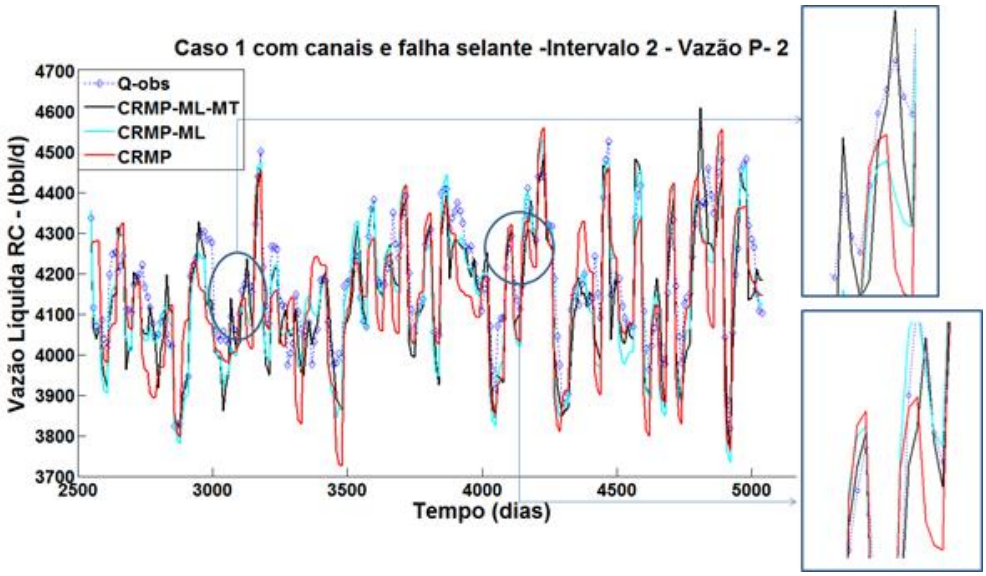
Nas Fig. 32 e 33, pode-se analisar o ajuste das curvas da vazão de produção líquida calculada pelas três estratégias do CRM e a vazão de produção líquida observada. Foram analisados os comportamentos de dois poços: P-1, que está do lado esquerdo da falha e P-2, que está do lado direito da falha e está ligado a I-3 por um canal de alta permeabilidade.

Figura 32 - Ajuste entre as curvas das vazões de produção calculada e observada para o poço P-1



Fonte: A autora

Figura 33 - Ajuste entre as curvas das vazões de produção calculada e observada para o poço P-2.



Fonte: A autora

Através do ajuste das curvas, percebe-se, como nos casos anteriores, que os modelos CRM-ML e o CRM-MLMT tem suas curvas bem ajustadas com os dados reais, mostrando que conseguem capturar com acurácia as heterogeneidades do modelo do reservatório. O CRMP apresenta maiores desvios que as outras duas estratégias, não só quanto ao ajuste como também a sua curva, em alguns pontos, apresenta tendência oposta à evolução da curva dos dados observados.

5.1.1.2 Cálculo considerando os dados do BHP desconhecidos e vazão inicial dos produtores conhecida

Em alguns casos nos campos reais não se tem disponível a informação do BHP, e na ausência dessa informação considera-se o BHP constante. Dessa forma, o terceiro termo da equação 2.16 fica nulo. Nesse caso, não é possível calcular o parâmetro (J_j), sendo o mesmo desconsiderado no modelo.

Para avaliar o impacto de não considerar os valores do BHP no cálculo dos parâmetros dos modelos CRM, ou seja, considerá-lo constante, e como consequência não ter no modelo o parâmetro (J_j), foram utilizados os mesmos dados da simulação do exemplo

anterior para os três exemplos a, b e c, e os cálculos dos parâmetros foram realizados sem utilizar os dados do BHP.

Com os parâmetros calculados, foi feita a comparação dos valores obtidos das conectividades, utilizando os dados do BHP e não utilizando os mesmos. Para esse estudo, os poços também precisam ser inteligentes, pois, todos os dados, com exceção do BHP que não foi utilizado, foram utilizados por camada.

No estudo anterior, no qual são conhecidos os dados de BHP e as vazões iniciais dos produtores, os resultados dos três exemplos a, b e c foram discutidos. Para a condição do cálculo dos parâmetros sem utilizar os dados do BHP, os resultados obtidos foram bastante próximos aos resultados da condição anterior, sendo válidas, para as relações entre as conectividades e as heterogeneidades dos modelos, as mesmas conclusões do caso anterior. Para discutir esse caso, portanto, foi escolhido um dos exemplos, para mostrar a comparação dos resultados obtidos com e sem a utilização dos dados do BHP.

O exemplo que será discutido é o c, o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, por ser o modelo de reservatório mais complexo, já que possui a maior diversidade de heterogeneidades entre os três modelos estudados.

A tabela 8 mostra os resultados das conectividades, calculadas pelo CRMP, considerando o BHP informado, e, portanto, utilizando-se sua variação ao longo da simulação. A tabela 9 mostra os resultados das conectividades considerando o BHP não informado, portanto constante e com variação nula.

Tabela 8 - Resultados das conectividades para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, calculadas pelo CRMP utilizando os dados do BHP.

CRMP - BHP INFORMADO (VARIÁVEL)					
	I1	I2	I3	I4	I5
P1	0,0811	0,2383	0,0000	0,0000	0,0374
P2	0,6366	0,2412	0,6649	0,6205	0,3379
P3	0,0225	0,5205	0,0000	0,0470	0,0522
P4	0,2597	0,0000	0,3351	0,3325	0,5725
SOMA l	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tabela 9 - Resultados das conectividades para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, calculadas pelo, CRMP sem utilização dos dados do BHP.

CRMP – BHP NÃO INFORMADO (CONSIDERADO CONSTANTE)					
	I1	I2	I3	I4	I5
P1	0,0148	0,3409	0,0000	0,0000	0,0000
P2	0,7546	0,0451	0,6120	0,6663	0,4260
P3	0,0000	0,6141	0,0000	0,0158	0,0108
P4	0,2306	0,0000	0,3880	0,3179	0,5632
SOMA l	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

As tabelas 10 e 11 a seguir mostram os resultados das conectividades, calculadas através do CRM-ML, com e sem os dados do BHP, respectivamente.

Tabela 10 - Resultados das conectividades para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, calculadas pelo CRM-ML utilizando os dados do BHP.

CRM-ML - BHP INFORMADO (VARIÁVEL)															
	I1-1	I1-2	I1-3	I2-1	I2-2	I2-3	I3-1	I3-2	I3-3	I4-1	I4-2	I4-3	I5-1	I5-2	I5-3
P1	0,0000	0,0000	0,1155	0,2894	0,4653	0,0000	0,0000	0,0000	0,0882	0,0000	0,0000	0,0631	0,0000	0,0000	0,0492
P2	1,0000	0,6195	0,3660	0,4227	0,1734	0,1289	1,0000	0,4465	0,3862	0,8708	0,5526	0,4274	0,5355	0,3440	0,2252
P3	0,0000	0,0065	0,0879	0,2878	0,3613	0,8711	0,0000	0,0277	0,0487	0,0499	0,0000	0,0564	0,0518	0,0000	0,0772
P4	0,0000	0,3739	0,4306	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,5258	0,4769	0,0793	0,4474	0,4531	0,4127	0,6560	0,6484
SOMA	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Tabela 11 - Resultados das conectividades para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, calculadas pelo CRM-ML sem utilização dos dados do BHP.

CRM-ML - BHP NÃO INFORMADO (CONSIDERADO CONSTANTE)															
	I1-1	I1-2	I1-3	I2-1	I2-2	I2-3	I3-1	I3-2	I3-3	I4-1	I4-2	I4-3	I5-1	I5-2	I5-3
P1	0,0000	0,0438	0,0481	0,2495	0,4349	0,0974	0,0000	0,0000	0,1218	0,0000	0,0000	0,0212	0,0000	0,0550	0,0000
P2	1,0000	0,6322	0,4745	0,2743	0,0562	0,0000	1,0000	0,4641	0,4150	0,9207	0,5719	0,4724	0,6261	0,3124	0,2866
P3	0,0000	0,0000	0,0572	0,3824	0,4232	0,9026	0,0000	0,0275	0,0133	0,0202	0,0000	0,0340	0,0192	0,0000	0,0440
P4	0,0000	0,3240	0,4201	0,0939	0,0857	0,0000	0,0000	0,5083	0,4498	0,0592	0,4281	0,4724	0,3547	0,6326	0,6694
SOMA	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

As tabelas 12 e 13 a seguir mostram os resultados das conectividades, calculadas através do CRM-MLMTC, com e sem os dados do BHP, respectivamente.

Tabela 12 - Resultados das conectividades para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, calculadas pelo CRM-MLMTC utilizando os dados do BHP.

CRM-MLMTC - BHP INFORMADO (VARIÁVEL)															
	I1-1	I1-2	I1-3	I2-1	I2-2	I2-3	I3-1	I3-2	I3-3	I4-1	I4-2	I4-3	I5-1	I5-2	I5-3
P1	0,0000	0,0000	0,1020	0,3074	0,4806	0,0532	0,0000	0,0000	0,0609	0,0000	0,0000	0,0653	0,0000	0,0000	0,0000
P2	1,0000	0,7793	0,3176	0,2044	0,0744	0,0717	1,0000	0,6915	0,2881	0,8915	0,5944	0,3323	0,6464	0,4161	0,2074
P3	0,0000	0,0000	0,0584	0,4882	0,4328	0,8751	0,0000	0,0000	0,0137	0,0000	0,0000	0,0387	0,0017	0,0000	0,0123
P4	0,0000	0,2207	0,5220	0,0000	0,0123	0,0000	0,0000	0,3085	0,6373	0,1085	0,4056	0,5637	0,3518	0,5839	0,7803
SOMA	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

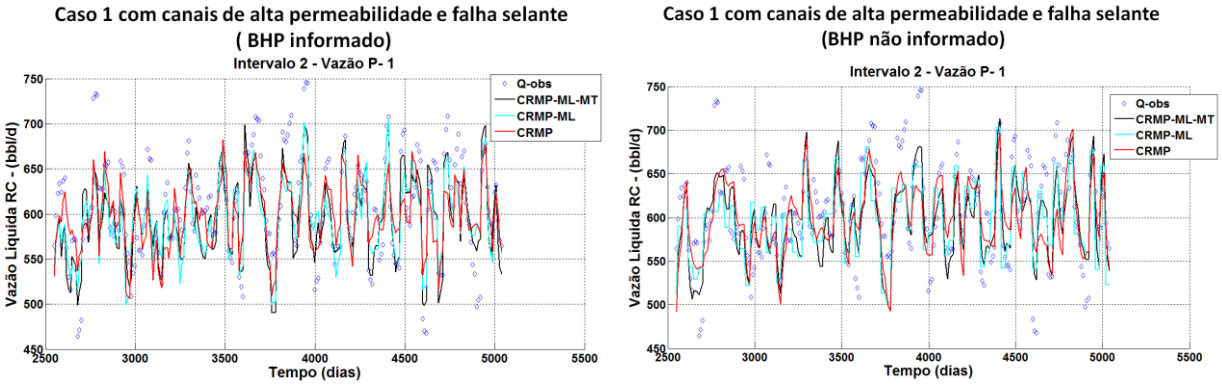
Tabela 13 - Resultados das conectividades para o caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante, calculadas pelo CRM-MLMTC sem utilização dos dados do BHP.

CRM-MLMTC - BHP NÃO INFORMADO (CONSIDERADO CONSTANTE)															
	I1-1	I1-2	I1-3	I2-1	I2-2	I2-3	I3-1	I3-2	I3-3	I4-1	I4-2	I4-3	I5-1	I5-2	I5-3
P1	0,0000	0,0076	0,0000	0,4203	0,5370	0,1022	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P2	1,0000	0,6075	0,6687	0,0523	0,0008	0,0018	0,9899	0,4420	0,5560	0,8443	0,5306	0,5606	0,5164	0,3872	0,3492
P3	0,0000	0,0000	0,0000	0,5005	0,4393	0,8943	0,0000	0,0429	0,0000	0,0043	0,0000	0,0000	0,0356	0,0000	0,0069
P4	0,0000	0,3849	0,3313	0,0270	0,0230	0,0016	0,0101	0,5151	0,4440	0,1514	0,4694	0,4394	0,4480	0,6128	0,6439
SOMA	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Comparando-se os valores obtidos para as conectividades considerando os dados de BHP e considerando tais dados desconhecidos, para cada um dos modelos, pode-se perceber que não houve diferença significativa entre os resultados.

A Fig. 34 a seguir mostra os gráficos dos ajustes das curvas entre os três modelos CRM e a curva dos dados observados, dos resultados da vazão de produção líquida, tomando como exemplo o produtor P-1, para os dois casos, ou seja, com e sem os dados do BHP.

Figura 34 - Ajuste de curvas (a) Utilizando os dados do BHP. (b) Sem utilizar dados do BHP.



(a) (b)

Fonte: A autora

Analisando o ajuste das curvas percebe-se que foram obtidos bons ajustes para os três modelos CRM, em ambas as situações. Portanto, caso os valores dos dados de BHP não sejam conhecidos, é possível utilizar o modelo CRM sem grande prejuízo na qualidade dos resultados.

5.1.1.3 Cálculo considerando os dados do BHP conhecidos e a vazão inicial dos produtores desconhecida

Quando são utilizados dados reais de campo para o cálculo dos parâmetros dos modelos CRM, pode ocorrer de a vazão inicial dos produtores não ser conhecida, e nesse caso, a vazão inicial deixa de ser um dado e passa a ser mais um parâmetro a ser otimizado.

Outra situação que pode ocorrer é a vazão inicial total do poço ser conhecida, porém, a vazão inicial por camada não ser um dado conhecido. Isso ocorre pois, considerando que a utilização dos poços inteligentes é ainda restrita, se o poço produtor for um poço convencional, a vazão inicial de produção conhecida é a total do poço (q_{0j}) e não as vazões inicias por camada, (q_{0j}^{α}).

Isso não representa um problema para as estratégias CRMP e CRM-ML, pois as mesmas não utilizam em suas equações analíticas a vazão de produção por camada e sim a vazão total do poço. Porém, causa um impacto na utilização do modelo CRM-MLMTC, pois, nessa estratégia, a vazão inicial em cada camada (q_{0j}^{α}) é necessária em sua equação analítica para o cálculo da vazão dos produtores, e na ausência desta informação, ela precisa ser definida, e passa a ser mais um parâmetro na otimização.

Logo, em tais situações a vazão inicial precisa ser otimizada, e por isso outro estudo realizado nessa pesquisa foi a utilização dos modelos CRM quando a vazão inicial de produção dos poços produtores não é um dado conhecido, nem a vazão total nem nas camadas, para avaliar como se comporta a otimização desse parâmetro.

Para isso, o cálculo dos parâmetros foi realizado considerando-se que os poços injetores são inteligentes, ou seja, as vazões de injeção nas camadas são conhecidas, enquanto que os poços produtores são poços convencionais, e, portanto, as vazões de produção nas camadas são desconhecidas.

Foi realizada a determinação dos parâmetros do CRM-MLMTC incluindo na otimização a vazão inicial em cada camada (q_{0j}^{α}), e comparou-se os valores obtidos na otimização com os valores fornecidos na simulação do IMEX (que estavam disponíveis, apenas não foram utilizados na hipótese de serem desconhecidos), para avaliar a aproximação do valor otimizado do valor observado.

A determinação da vazão inicial através da otimização deste parâmetro foi realizada para os três exemplos estudados, mostrando um bom resultado na aproximação entre o valor obtido através da otimização e a vazão observada, obtida no IMEX. O exemplo a, caso 1 com canais de alta permeabilidade, foi escolhido para mostrar os resultados desse estudo.

Nas tabelas 14, 15, 16 e 17 a seguir, podem-se observar os resultados para as vazões iniciais dos produtores P-1, P-2, P-3 e P-4, respectivamente, calculadas pelos três modelos do CRM. Para o modelo CRM-MLMTC, o resultado que está sendo mostrado é a média entre as vazões otimizadas para cada camada. As tabelas mostram também, para cada modelo, o erro entre a vazão observada e as vazões calculadas pela otimização.

Tabela 14 - Comparação entre a vazão inicial observada (IMEX) e calculada através de otimização para P-1.

	P-1			
	VAZÃO OBSERVADA	VAZÃO CALCULADA CRMP	VAZÃO CALCULADA CRM-ML	VAZÃO MÉDIA CALCULADA CRM-MLMTC
$q_{01}\,(m^3)$	1.248,563	1.216,292	1.219,668	1.250,534
ERRO (%)		2,584	2,314	0,158

Tabela 15 - Comparação da vazão inicial observada (IMEX) e calculada através de otimização para P-2.

	P-2			
	VAZÃO OBSERVADA	VAZÃO CALCULADA CRMP	VAZÃO CALCULADA CRM-ML	VAZÃO MÉDIA CALCULADA CRM-MLMTC
$q_{02}\,(m^3)$	3.113,500	2.999,752	3.077,083	3.137,736
ERRO (%)		3,653	2,578	1,971

Tabela 16 - Comparação entre a vazão inicial observada (IMEX) e calculada através de otimização para P-3.

	P-3			
	VAZÃO OBSERVADA	VAZÃO CALCULADA CRMP	VAZÃO CALCULADA CRM-ML	VAZÃO MÉDIA CALCULADA CRM-MLMTC
$q_{03}\,(m^3)$	2.575,188	2.671,891	2.661,716	2.551,961
ERRO (%)		3,755	0,380	4,123

Tabela 17 - Comparação entre a vazão inicial observada (IMEX) e calculada através de otimização para P-4.

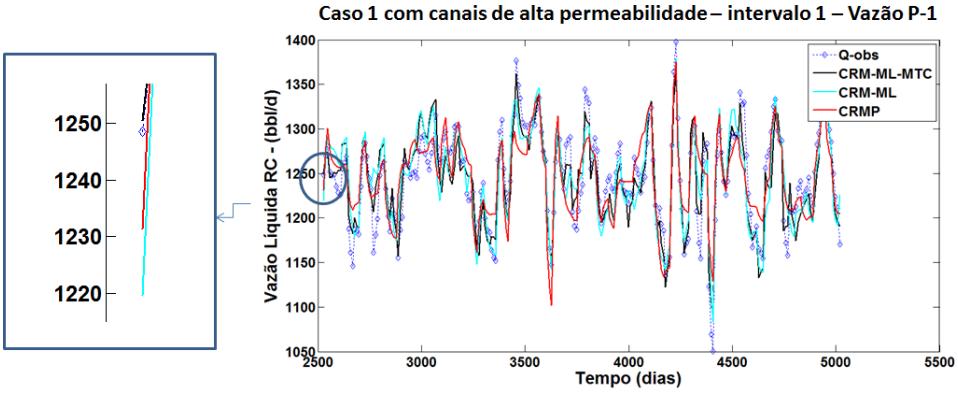
	P-4			
	VAZÃO OBSERVADA	VAZÃO CALCULADA CRMP	VAZÃO CALCULADA CRM-ML	VAZÃO MÉDIA CALCULADA CRM-MLMTC
$q_{04}\,(m^3)$	1.470,688	1.519,986	1.489,557	1.457,425
ERRO (%)		3,352	2,002	2,157

Pode-se observar que os resultados obtidos para os valores da vazão inicial no caso 1 com canais de alta permeabilidade foram satisfatórios. Os resultados calculados estão bem próximos ao valor observado, e analisando os valores dos erros podemos concluir que são todos pequenos.

Os resultados obtidos para os outros dois casos tiveram um comportamento próximo aos resultados mostrados para o caso com canais de alta permeabilidade. Pode-se então concluir que quando não é conhecida a vazão inicial, ela poderá passar a fazer parte dos parâmetros do CRM a serem otimizados, pois sua otimização tem bons resultado, que se aproximam, com pequenos erros, dos valores observados.

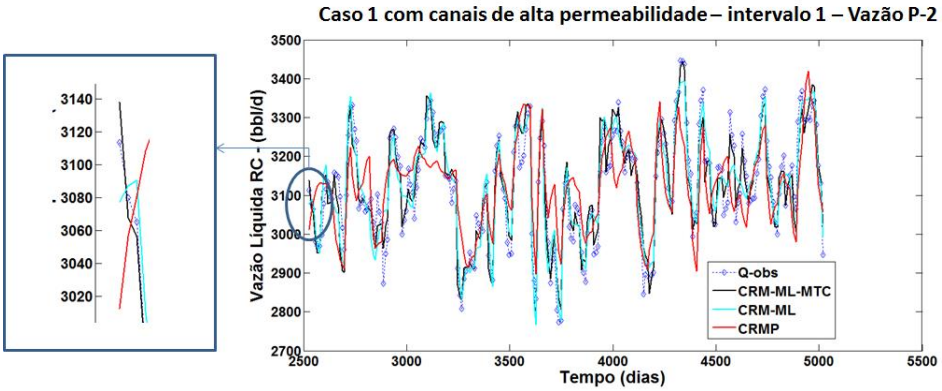
As Fig. 35, 36, 37 e 38 a seguir mostram o ajuste da das curvas da vazão líquida de produção calculada e observada para os poços P-1, P-2, P-3 e P-4, respectivamente, com a vazão de produção calculada como parâmetro da otimização. A vazão inicial, calculada pela otimização, é comparada a vazão inicial do IMEX.

Figura 35 - Ajuste das curvas da vazão calculada e observada com a vazão inicial como parâmetro da otimização.



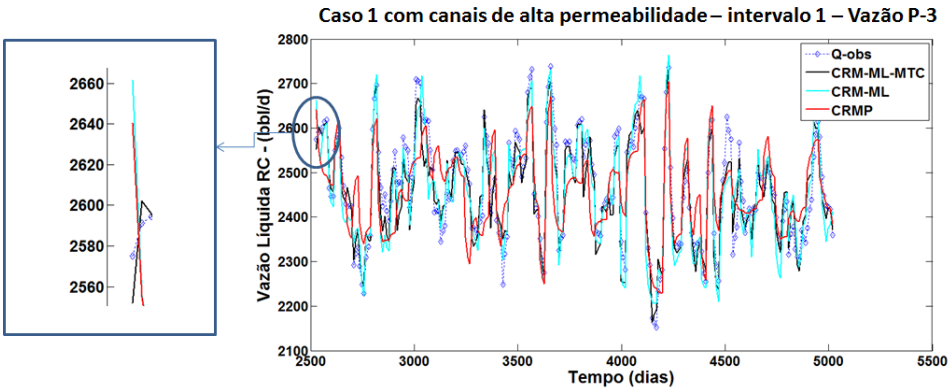
Fonte: A autora

Figura 36 - Ajuste das curvas da vazão calculada e observada com a vazão inicial como parâmetro da otimização.



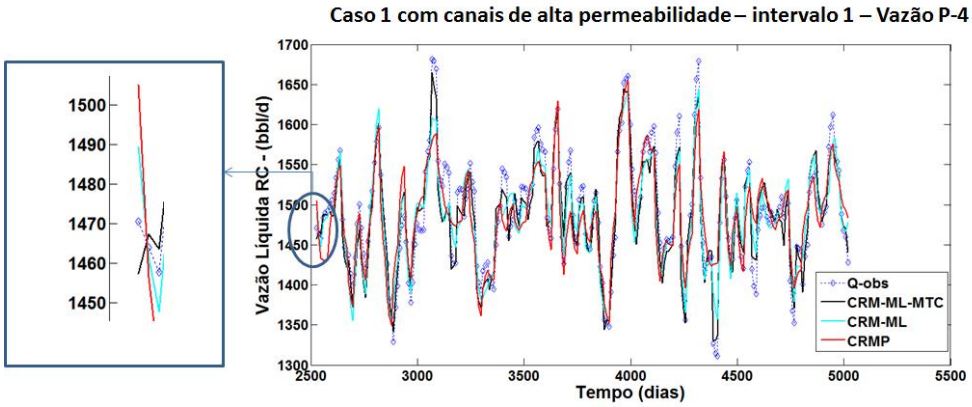
Fonte: A autora

Figura 37 - Ajuste das curvas da vazão calculada e observada com a vazão inicial como parâmetro da otimização.



Fonte: A autora

Figura 38 - Ajuste das curvas da vazão calculada e observada com a vazão inicial como parâmetro da otimização.



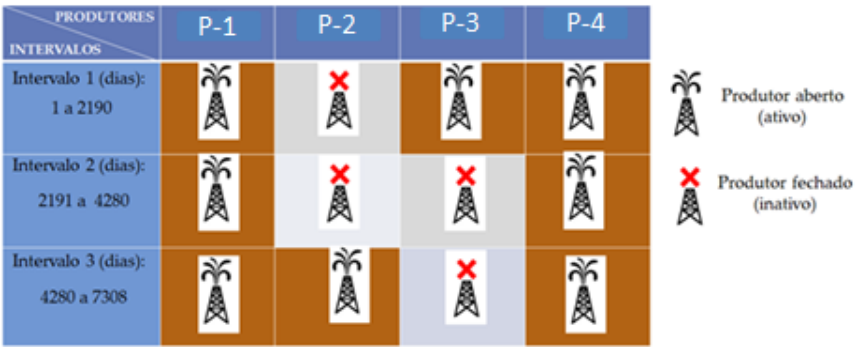
Fonte: A autora

Observando as figuras pode-se perceber, através da ampliação do ponto onde está a vazão inicial, que o valor observado está mesmo próximo dos valores calculados pelos modelos do CRM. Além disso, pode-se ver também que existe um bom ajuste ao longo das curvas. Isso mostra que caso a vazão inicial precise ser otimizada, mesmo representando um parâmetro a mais a ser calculado, isso não prejudica o resultado geral do modelo CRM, o qual continua mostrando bom desempenho.

5.1.1.4 Simulação com abertura e Fechamento de Poços

Para avaliar o efeito de abertura e fechamento dos poços no cálculo dos parâmetros do CRM, foi realizada, para cada um dos 3 modelos sintéticos acima descritos, uma simulação, com duração de 20 anos, porém divididos em 3 intervalos de tempo: o primeiro do dia 1 ao 2190, no qual P-2 iniciou fechado, o segundo do dia 2191 ao dia 4280, no qual P-3 foi também fechado e o terceiro e último, do dia 4281 até o final, dia 7308, no qual P-2 foi aberto. A tabela 18 a seguir ilustra os intervalos de tempo descritos:

Tabela 18 - Status dos poços nos intervalos durante a simulação



O clássico CRMP, apesar da abertura e fechamento dos poços durante a simulação, calcula os parâmetros de forma fixa para toda a simulação. As estratégias CRM-ML e CRM-MLMTC calculam os parâmetros dinâmicos no tempo, ou seja, para cada intervalo da simulação, um novo conjunto de parâmetros é calculado. Portanto, para o CRMP, um único conjunto de parâmetros é calculado enquanto para as outras estratégias temos 3 conjuntos de parâmetros, um para cada intervalo de tempo.

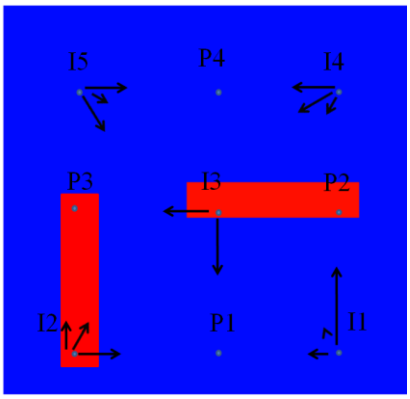
Para avaliar o desempenho dos modelos nesse estudo de simulações com abertura e fechamento de poços, mais uma vez foi feito o ajuste entre os gráficos das vazões de produção calculadas e observadas, sendo as vazões observadas as vazões informadas pelo simulador e as vazões calculadas são as vazões obtidas através das equações analíticas dos modelos do CRM.

Em posse das vazões calculadas, é feito o gráfico das curvas das vazões calculadas e observadas para avaliar como se comporta o ajuste entre as mesmas em cada intervalo de tempo. Os resultados obtidos para cada modelo sintético utilizando cada uma das estratégias serão mostrados a seguir.

a) Caso 1 com canais de alta Permeabilidade

Os resultados dos parâmetros calculados através dos 3 modelos do CRM, para esse exemplo, podem ser observados no apêndice D. A Fig. 39 a seguir mostra o gráfico das conectividades através das setas, para o modelo CRMP.

Figura 39 - Conectividades entre os pares de poços produtores/injetores, calculadas pelo CRMP.



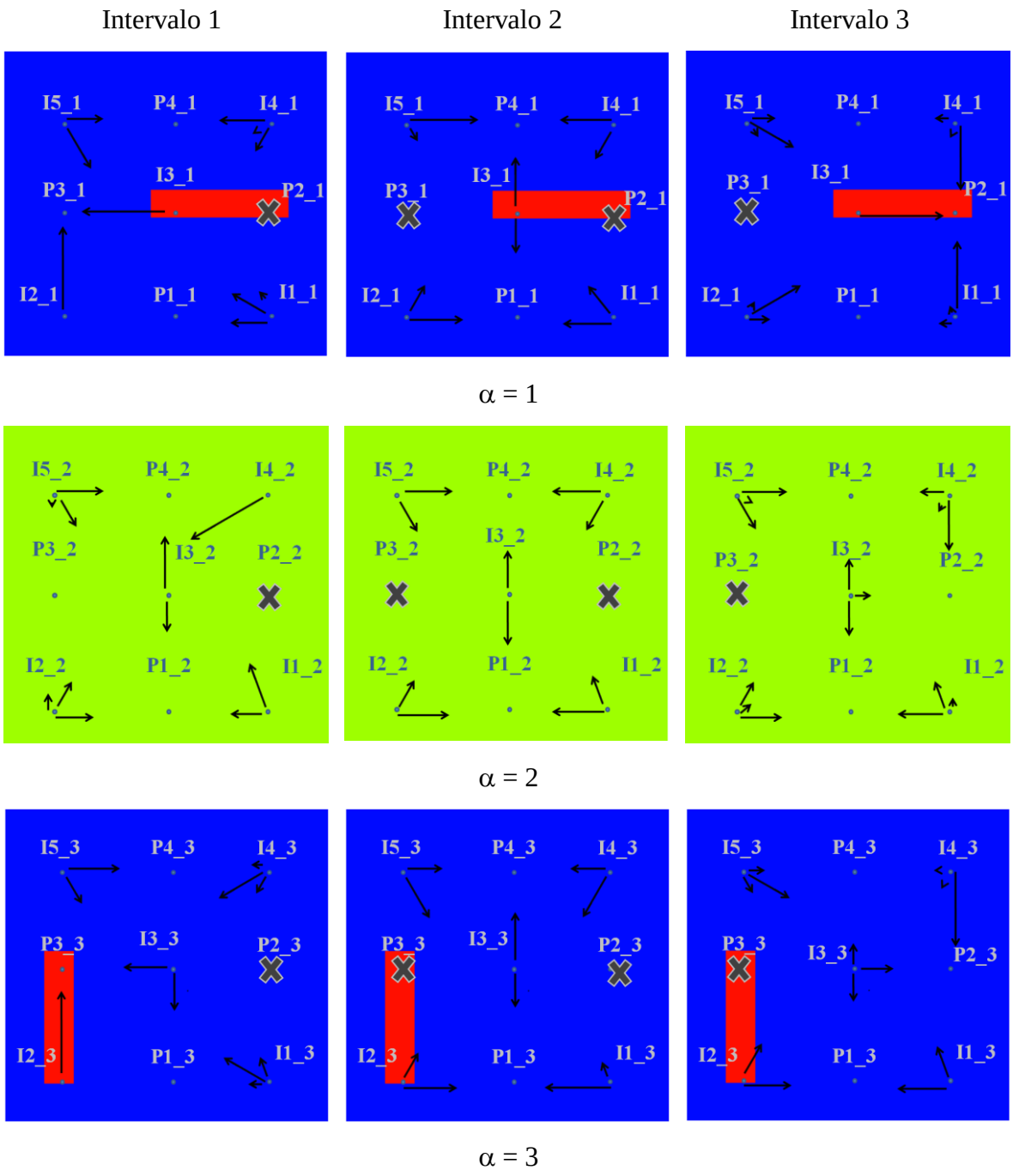
Fonte: A autora

Na Fig. 39 pode-se observar que a conectividade entre I-3 e P-2 é nula, mesmo havendo um canal de alta permeabilidade entre esses dois poços. Ocorre que o canal está presente apenas na primeira camada do reservatório e o P-2 fica fechado durante os dois primeiros intervalos da simulação, abrindo apenas no terceiro. De fato, existiu conectividade entre eles apenas no último intervalo da simulação e a alta conectividade ocorreu em apenas uma camada, e como o CRMP determina um parâmetro para todos os intervalos e camadas, acaba resultando em uma conectividade nula.

Como o CRMP considera a simulação em um único intervalo de tempo, sem considerar as aberturas e fechamentos dos poços, além de compactar o reservatório em uma só camada, as conectividades obtidas representam médias das conectividades dos intervalos parciais da simulação, considerando os poços ativos (abertos), ou inativos (fechados) durante toda a simulação, assim como médias das características geológicas das camadas.

A Fig. 40 mostra o gráfico das conectividades através das setas, para o caso 1 com canais de alta permeabilidade, calculadas utilizando o modelo CRM-MLMTC, em cada camada e em cada intervalo de tempo.

Figura 40 - Conectividades entre os pares de poços produtores/injetores, calculadas pelo CRM-MLMTC.



Fonte: A autora

Pode-se verificar que no caso do modelo CRM-MLMTC, como os parâmetros são calculados para cada intervalo da simulação, o modelo é capaz de detectar os poços ativos

(abertos) e inativos (fechados) naquele intervalo, calculando as conectividades em função da situação do poço.

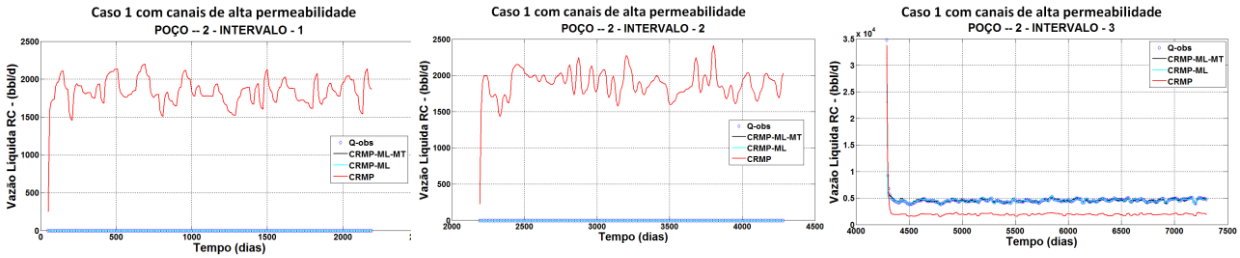
Dessa forma, pegando novamente o exemplo do produtor P-2 em relação ao injetor I-3, através dos resultados do CRM-MLMTC, claramente percebe-se que, devido ao poço estar fechado durante os dois primeiros intervalos da simulação, a conectividade entre ele e I-3, nesses dois intervalos, é nula.

Porém, quando P-2 é aberto, no terceiro intervalo, pode-se perceber que passa a existir conectividade entre P-2 e I-3 e ainda, que ela é bastante expressiva na primeira camada, devido à presença do canal, e diminui nas outras duas camadas.

Observando ainda P-2 em relação aos demais injetores, verifica-se também que nos dois primeiros intervalos não existe conectividade entre esse produtor e os demais injetores, passando a existir a durante o intervalo 3, como era o esperado.

Os gráficos do ajuste das curvas das vazões calculadas e observadas do poço P-2, nos três intervalos da simulação, calculadas pelos 3 métodos do CRM, estão na Fig. 41 a seguir:

Figura 41 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas do produtor P-2 calculadas pelos CRMP, CRM- ML e CRM-MLMTC e observadas. (a) Intervalo um. (b) Intervalo dois. (c) Intervalo três.



(a) (b) (c)

Fonte: A autora

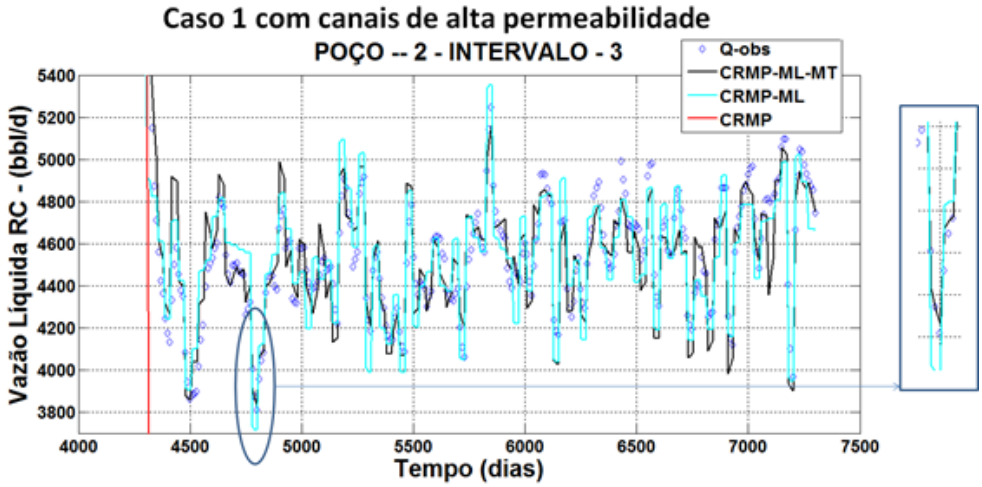
Observa-se pelo gráfico que, para esse caso de heterogeneidade com a simulação envolvendo abertura e fechamento de poços, a curva da vazão líquida do P-2, calculada pelo CRMP, que considera uma única camada e parâmetros constantes, sofreu um grande desvio

da curva da vazão líquida observada, pois não captura nem as heterogeneidades nem se o poço está ativo ou não.

Pode-se perceber que nos intervalos 1 e 2, apesar de P-2 estar fechado, pela estratégia CRMP existe vazão de produção no mesmo. Já as curvas calculadas pelo CRM-ML e pelo CRM-MLMTC, para os quais os parâmetros são calculados para cada modificação na quantidade de poços produtores ativos, tiveram um excelente ajuste, mostrando, portanto, que conseguem detectar as divisões da simulação e os poços ativos e inativos nos respectivos intervalos.

Observando os gráficos dos três intervalos da simulação, é possível verificar que a vazão calculada pelo CRMP se mantém numa média de 2000 bbl/dia, não demonstrando mudança devido à abertura e fechamento de poços. Já os outros dois modelos mostram a vazão nula nos dois primeiros intervalos e no terceiro, quando o poço é então aberto, a vazão passa a ser em torno de 4500 bbl/dia. Podemos observar esse valor na Fig. 42 a seguir, mostrando o efeito da mudança da condição do poço de inativo para ativo.

Figura 42 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculada e observada durante o intervalo 3 .



Fonte: A autora

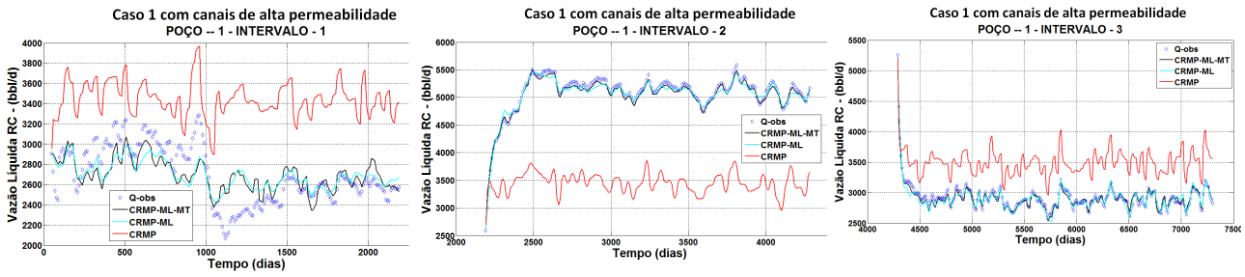
Durante os intervalos 1 e 2 o poço P-2 permaneceu fechado e, portanto, as curvas das vazões do CRM-ML e do CRM-MLMTC são retas representando fluxo igual a zero. Porém,

no terceiro intervalo, quando existe produção, podemos analisar o ajuste das curvas calculadas por esses modelos e a curva dos dados observados.

A Fig. 42 é uma ampliação do gráfico da Fig. 41 (c), onde observa-se melhor as curvas, e assim verifica-se que nesse terceiro intervalo foi obtido um bom ajuste entre as curvas de vazão do produtor P-2 calculadas através dos parâmetros obtidos pelo CRM-ML e CRM-MLMTC e os dados observados para esse poço. Novamente o CRM-MLMTC mostrou ter um ajuste ainda melhor que o CRM-ML.

Outra análise para esse modelo foi do poço P-1, o qual permanece aberto durante toda a simulação. A Fig. 43 a seguir mostra o ajuste entre as curvas calculadas através das 3 estratégias do CRM, nos três intervalos da simulação, para o poço P-1, e os dados observados para esse mesmo poço.

Figura 43 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. (a) Intervalo 1. (b) Intervalo 2. (c) Intervalo 3.



(a) (b) (c)

Fonte: A autora

O poço P-1 é mantido aberto durante toda a simulação, contudo pode-se perceber que o mesmo sofre influência das mudanças de abertura e fechamento dos seus poços vizinhos. Quando a simulação inicia, P-2 está fechado e P-3 está aberto, sendo este último fechado no intervalo dois. No intervalo três, P-2, que iniciou fechado, é aberto.

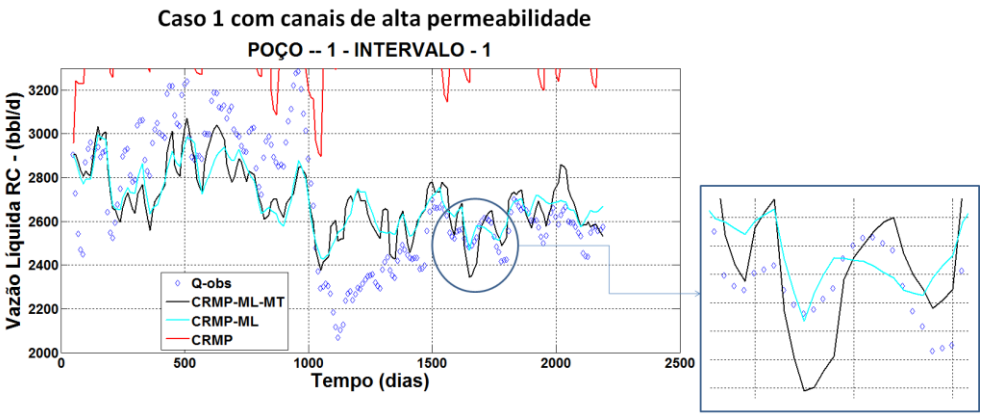
Novamente observamos que o CRMP, considerando um único intervalo para toda a simulação, mantém constante os seus parâmetros e não captura essas mudanças de abertura e fechamento dos poços. A curva de P-1 se mantém em uma vazão média durante toda a

simulação, que permanece entre as vazões observadas mais altas, no intervalo dois, e as vazões observadas mais baixas, nos intervalos um e três, não se ajustando a curva dos dados observados em nem um dos três intervalos.

Analisando a curva do CRM-ML e CRM-MLMTC, pode-se perceber que os mesmos conseguem capturar com precisão esses impactos na vazão de P-1, devido à abertura e fechamento dos poços produtores vizinhos, apresentando um bom ajuste das curvas, acompanhando a curva dos dados observados a cada intervalo de tempo.

Ampliando os gráficos das Fig. 43 (a), (b) e (c), observa-se com mais precisão, nas Fig. 44, 45 e 46 a seguir, o ajuste das curvas dos modelos CRM-ML e CRM-MLMTC. Na Fig. 44, pode-se observar que o poço P-1 inicia a simulação com uma vazão média de 2.700 bbl/dia.

Figura 44 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas.



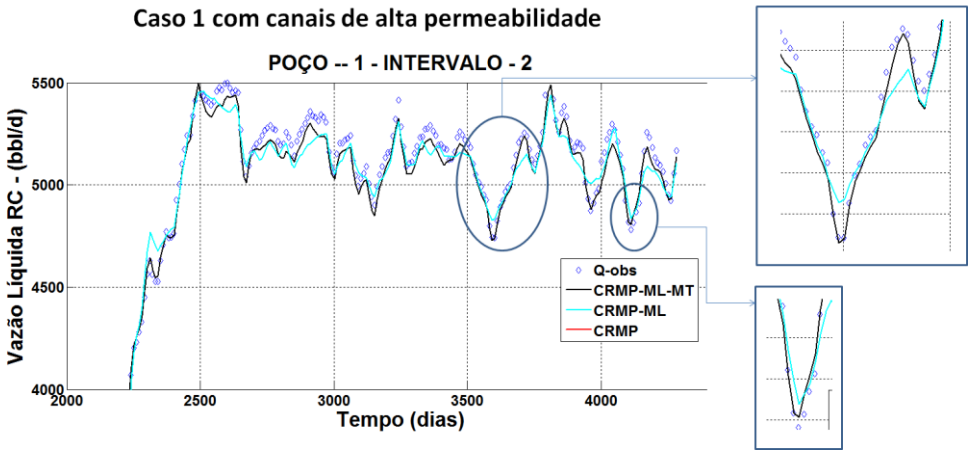
Fonte: A autora

No início do primeiro intervalo, observam-se significativos desvios entre as curvas observada e calculada. Isso ocorre porque este é um período de estabilização das condições do reservatório, gerando dados que não retornam um bom resultado para os parâmetros dos modelos CRM. Pode-se observar que após os 1500 dias, as curvas já se ajustam bem melhor.

Na Fig. 45, observa-se que do intervalo um para o intervalo dois há um aumento da vazão de P-1, devido à água que ia para P-3, que passa a ser inativo no segundo intervalo, ser

redistribuída entre os poços ativos P-1 e P-4. A vazão de P-1 aumenta de uma média de 2.600 bbl/dia, no primeiro intervalo, para uma média de 5250 bbl/dia, no segundo intervalo.

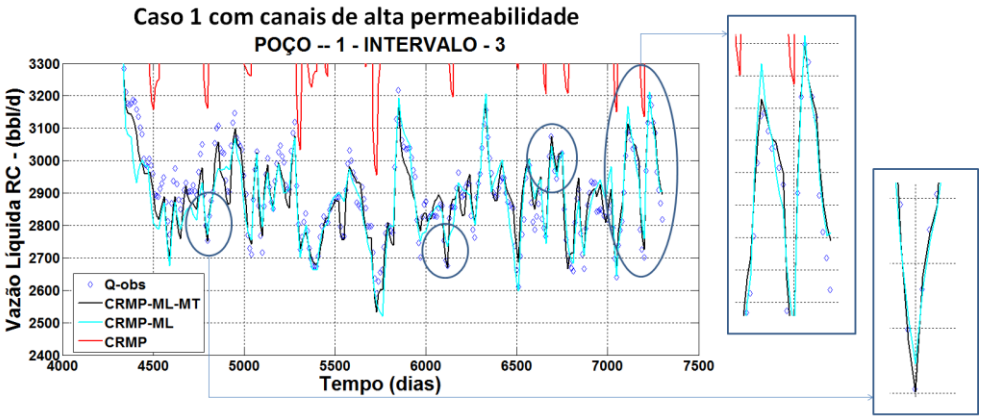
Figura 45 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas



Fonte: A autora

No intervalo seguinte, ou seja, no intervalo três, P-2 é aberto provocando diminuição na vazão de P-1, pois a água que estava sendo direcionada apenas para P-1 e P-4 será redistribuída entre eles e P-2, que passa a ser ativo nesse último intervalo. Na Fig. 46 a seguir podemos observar o gráfico ampliado das curvas de produção líquida de P-1 no terceiro intervalo.

Figura 46 - Comparação do ajuste das curvas das vazões calculadas e observadas.



Fonte: A autora

Verifica-se nesse terceiro intervalo que a vazão de P-1 volta a média 2.700 bbl/dia como no primeiro intervalo, ou seja, a abertura de P-2 com P-3 fechado teve um efeito semelhante em P-1 ao de P-3 fechado e P-2 aberto, situação do primeiro intervalo. Isso se deve ao fato de P-2 e P-3 serem vizinhos equidistantes de P-1, e ambos têm um canal de alta permeabilidade conectado a ele, tornando então os efeitos de abertura e fechamento dos mesmos semelhantes em relação a P-1.

Através das figuras mostradas, pode-se concluir que há de fato um bom ajuste entre as curvas das vazões calculadas pelos modelos CRM-ML, assim como pelo CRM-MLMTC, e a curva dos dados observados. Mais uma vez, entre os três modelos, o CRM-MLMTC mostra o melhor ajuste.

b) Caso 1 com Falha selante

O segundo caso analisado, com a mesma condição de abertura e fechamento de poços, foi o caso 1 com a falha selante. A simulação foi realizada da mesma forma do caso anterior, ou seja, as condições de abertura e fechamento dos poços mudaram de acordo com a tabela 18.

A Fig. 47 a seguir mostra o ajuste das curvas entre os 3 modelos CRM e os dados observados durante a simulação para o poço P-2.

Figura 47 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. (a) Intervalo 1. (b) Intervalo 2. (c) Intervalo 3.

(a) (b) (c)

Fonte: A autora

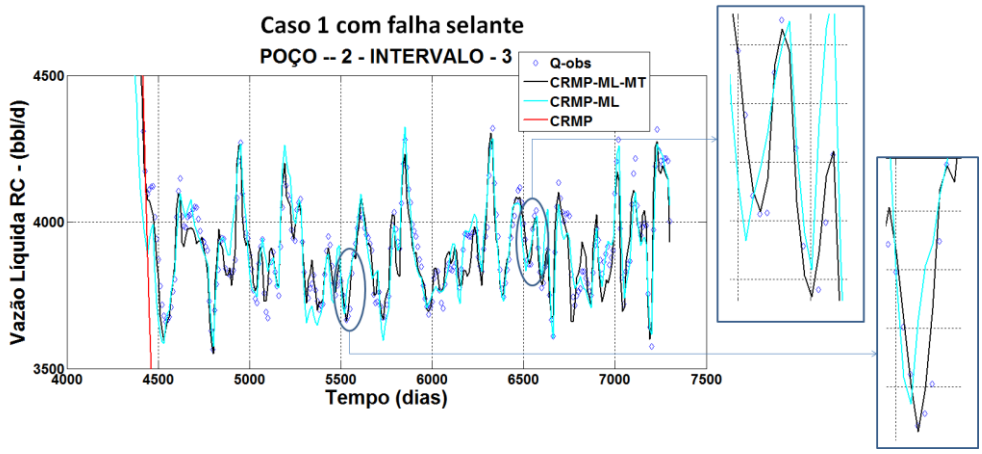
Como já foi comentando no caso anterior, também nesse caso de heterogeneidade com a simulação envolvendo abertura e fechamento de poços, a curva da vazão líquida do

P-2, calculada pelo CRMP, sofreu novamente um grande desvio da curva da vazão líquida observada. O método não detecta nem as heterogeneidades do reservatório nem se o poço está ativo ou não. Mesmo nos intervalos 1 e 2, estando P-2 fechado e não havendo fluxo no mesmo, pela estratégia CRMP existe vazão de produção neste poço.

Por outro lado, verifica-se novamente que as curvas calculadas pelos parâmetros do CRM-ML e CRM-MLMT, para os quais os parâmetros são calculados para cada modificação na quantidade de poços produtores ativos, novamente mostraram um bom ajuste em relação aos dados observados.

Ampliando o gráfico do intervalo 3, mostrado na Fig.47 (c), no qual há fluxo em P-2, pode-se analisar bem o ajuste entre as curvas dos modelos e os dados observados, como mostra a Fig. 48 a seguir.

Figura 48 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas.



Fonte: A autora

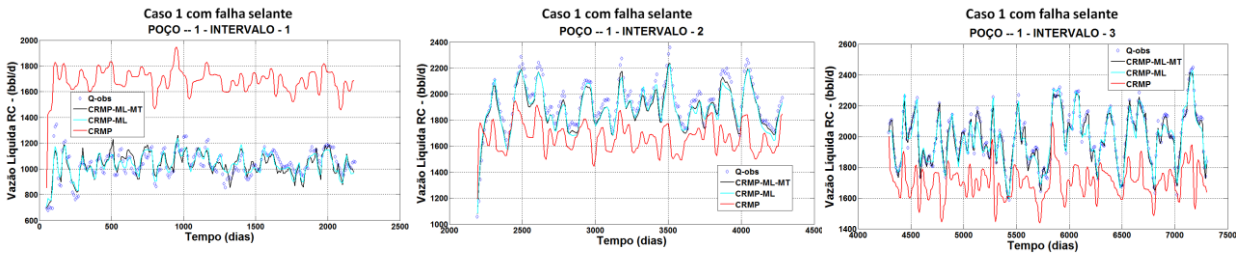
Pela Fig. 48 pode-se verificar que houve de fato um ajuste muito satisfatório entre as curvas das vazões calculadas pelo CRM-ML e pelo CRM-MLMTC.

Ainda analisando o caso 1 com falha, foram observados também os gráficos da vazão líquida de produção de P-1. O poço produtor P-1, diferente de P-2, é mantido aberto durante toda a simulação e ainda P-2 e P-1 encontram-se em lados opostos da falha.

Nesse caso, a vazão de produção de P-1, como no caso anterior, também sofrerá o reflexo da mudança do fluxo dos fluidos no reservatório devido à abertura e fechamento dos poços P-2 e P-3. Neste caso, porém, devido à falha, o comportamento do fluxo de P-1 será diferente do caso anterior.

A Fig. 49 a seguir mostra o ajuste entre as curvas do fluxo de produção líquida de P-1, calculado pelos 3 modelos do CRM, e os dados do fluxo líquido de P-1 observado no simulador.

Figura 49 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. (a) Intervalo 1. (b) Intervalo 2. (c) Intervalo 3.



(a) (b) (c)

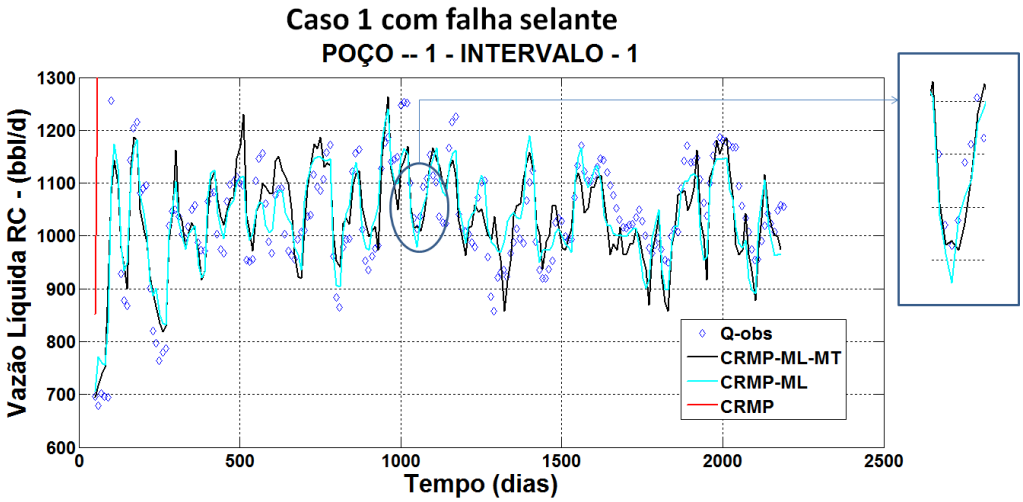
Fonte: A autora

Também nesse exemplo, a curva calculada através dos parâmetros do CRMP para o poço P-1, mesmo este poço sendo mantido aberto durante toda a simulação, apresenta um grande desvio em relação aos dados observados. Isso porque apesar de ele não ser fechado durante a simulação, seu fluxo reflete as mudanças que ocorrem nos seus vizinhos P-2 e P-3.

Da mesma forma, quando a simulação inicia, P-2 está fechado e P-3 está aberto. P-1 está localizado do lado esquerdo da falha, junto com um único produtor P-3 e um único injetor, I-2, o qual distribui a água injetada entre esses dois injetores. No exemplo mostrado anteriormente do caso 1 com falha, verifica-se que, estando P-1 e P-3 do mesmo lado da falha, junto com o injetor I-2, as conectividades encontradas mostram que I-2 tem influência expressiva nesses dois produtores, e por sua vez, esses produtores não sofrem influência significativa da injeção dos injetores do lado oposto da falha.

Ampliando o gráfico da Fig. 49 (a), pode-se verificar na Fig. 50 que no primeiro intervalo P-1 inicia com a vazão líquida média de 1.000 bbl/dia.

Figura 50 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas

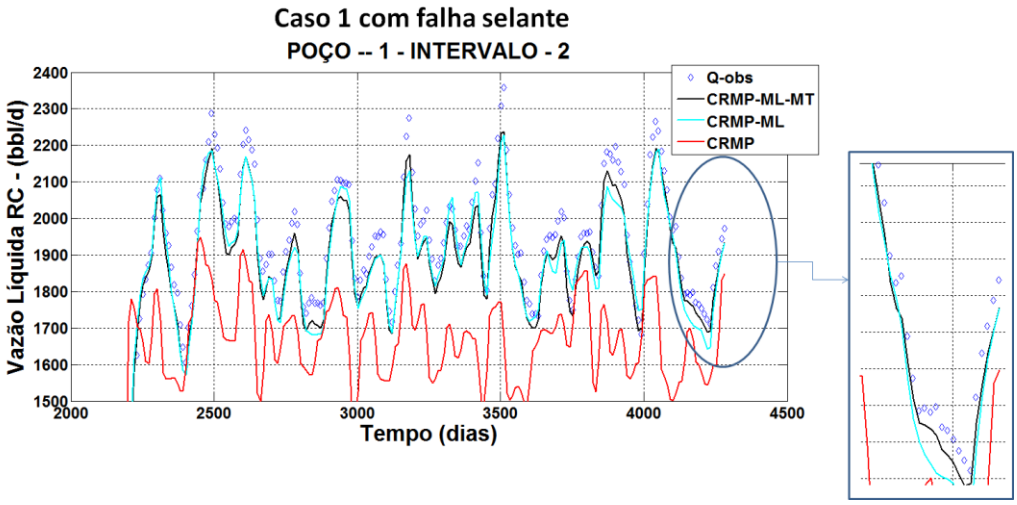


Fonte: A autora

No intervalo 2, P-3 que estava ativo é fechado, aumentando a vazão de P-1, em relação ao intervalo 1. No caso anterior, a água que ia para P-3, que passa a ser inativo no segundo intervalo, é redistribuída entre os poços ativos P-1 e P-4. Nesse caso, onde há a falha, a água que ia para P-3 é toda direcionada apenas para P-1, pois P-4 está do lado oposto da falha.

A Fig. 51 a seguir mostra o gráfico ampliado da Fig. 49 (b), intervalo 2.

Figura 51 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas.

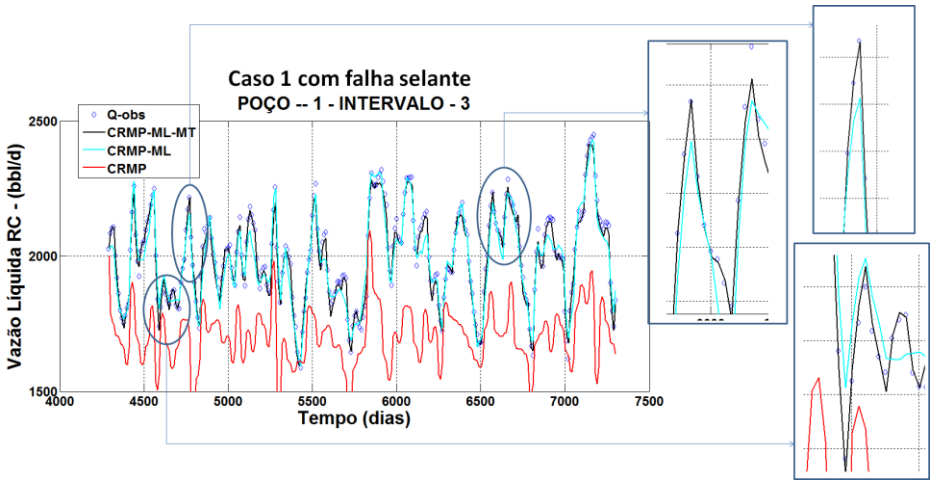


Fonte: A autora

Na Fig. 51 pode-se observar que a vazão de P-1, no intervalo 2, aumenta para uma média de 2.000 bbl/dia.

No intervalo seguinte, ou seja, no intervalo três, P-2 é aberto. Diferente do caso anterior, no qual a abertura de P-2 provocou a diminuição na vazão de P-1, observa-se nesse caso com a falha que no terceiro intervalo não haverá alteração na vazão de P-1. A Fig. 52 a seguir mostra o gráfico ampliado da Fig. 49 (c).

Figura 52 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas.



Fonte: A autora

Observando o gráfico, pode-se verificar que a vazão de produção do poço P-1 durante o terceiro intervalo continua em média 2000 bbl/dia. Isso se explica, pois P-2, que foi aberto no terceiro intervalo passando a ser ativo, está, em relação a P-1, do lado oposto da falha. Logo, a mudança do fluxo dos fluidos ocorre do lado da falha oposta ao que está localizado o poço P-1, e, portanto, essa mudança não interfere no comportamento da vazão do mesmo.

Novamente é observado que o CRMP, considerando um único intervalo para toda a simulação, mantém constante os seus parâmetros e não captura essas mudanças das condições dos poços. Sua curva se mantém em uma vazão média de produção líquida de 1700 bbl/dia durante toda a simulação, não se ajustando a curva dos dados observados em nem um dos três intervalos.

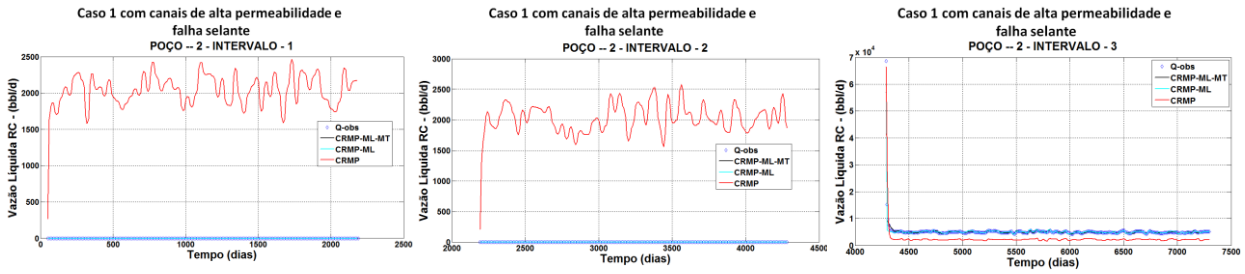
Analisando a curva do CRM-ML e CRM-MLMTC, que calculam as conectividades de forma dinâmica, pode-se perceber que os mesmos conseguem capturar com precisão esses impactos na vazão de P-1, devido à abertura e fechamento do poço produtor vizinho P-3, pois nesse caso, o poço P-2, apesar de vizinho, está separado de P-1 pela falha e, portanto, a mudança na sua condição não afeta o comportamento de P-1. As curvas desses modelos apresentaram um bom ajuste em relação à curva dos dados observados nos três intervalos de tempo.

c) Caso 1 com canais de alta permeabilidade e falha selante

Neste terceiro exemplo estão presentes as duas heterogeneidades, ou seja, os canais de alta permeabilidade e a falha selante, e ainda a simulação com abertura e fechamento de poços.

Na Fig. 53 pode-se analisar o ajuste das curvas da vazão de produção líquida calculada pelas três estratégias do CRM e a vazão de produção líquida observada do poço P-2, que foi escolhido por ser um poço que tem a ele conectado o canal de alta permeabilidade, que representa uma heterogeneidade entre as suas camadas, além de sofrer mudança de inativo para ativo durante a simulação.

Figura 53 - Comparação do ajuste das curvas das vazões calculadas e observadas. (a) Intervalo 1. (b) Intervalo 2. (c) Intervalo 3



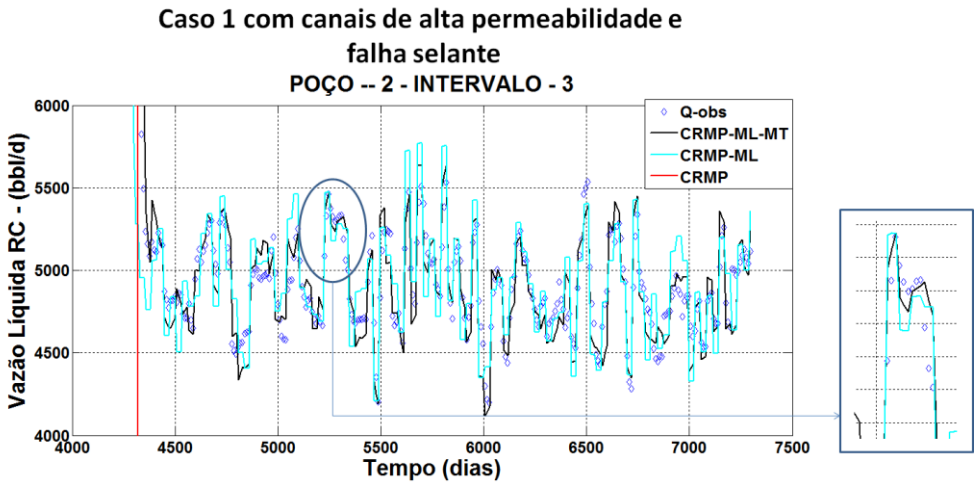
(a) (b) (c)

Fonte: A autora

Mais uma vez, percebe-se que o CRMP apresenta maiores desvios que as outras duas estratégias, não conseguindo se ajustar aos dados observados, pelos motivos já explanados nos casos anteriores, e mesmo nos intervalos nos quais o poço está fechado, o modelo calcula vazão para o mesmo.

Na Fig. 54 observa-se o gráfico ampliado do intervalo 3, no qual P-2 é aberto.

Figura 54 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas.



Fonte: A autora

Pode-se perceber, como nos casos anteriores, que os modelos CRM-ML e o CRM-MLMTC tem suas curvas bem ajustadas com os dados reais. Durante os dois primeiros intervalos, nos quais P-2 está fechado, logo seu fluxo é nulo, as curvas desses dois modelos são representadas pela reta:

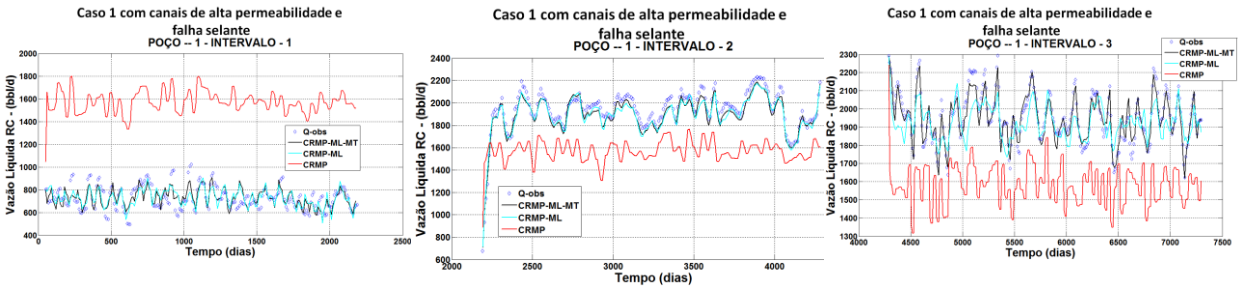
$$y(x) = 0 \tag{5.1}$$

ou seja, representam fluxo nulo.

No terceiro intervalo, conforme mostra a Fig. 54, o CRM-ML e o CRM-MLMTC apresentam um ótimo ajuste entre as curvas das vazões calculadas através de seus parâmetros e a curva dos dados observados, mostrando que ambos os modelos conseguem capturar com acurácia as heterogeneidades do reservatório e a dinâmica da simulação.

Analisando ainda para esse caso a vazão de produção de P-1, o qual é mantido aberto durante toda a simulação, a Fig. 55 a seguir mostra os resultados do ajuste entre as curvas de sua produção líquida calculada e dos dados observados nos três intervalos da simulação.

Figura 55 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas. (a) Intervalo 1. (b) Intervalo 2. (c) Intervalo 3.



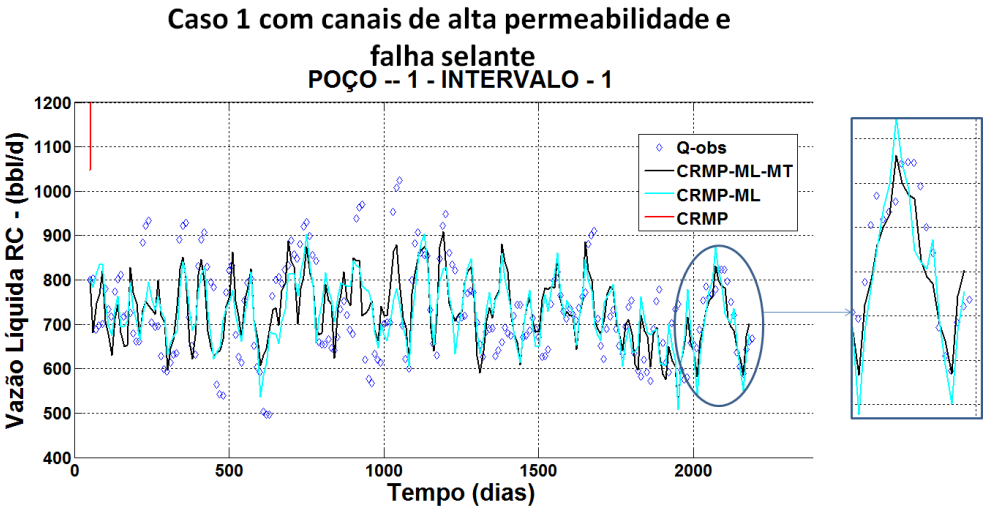
(a) (b) (c)

Fonte: A autora

Mais uma vez, esse exemplo mostra que para o caso de um reservatório com heterogeneidades e para uma simulação com abertura e fechamento de poços, o CRMP, que não considera os parâmetros por camada e também não faz o cálculo dinâmico dos parâmetros, não apresenta um bom resultado para as conectividades e consequentemente para o ajuste das curvas de vazão de produção com os dados observados, em nem um dos intervalos da simulação.

As Fig. 56, 57 e 58 a seguir representam a ampliação dos gráficos da vazão líquida de produção de P-1 para os três intervalos da simulação mostrados na Fig. 55 (a), (b) e (c).

Figura 56 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas

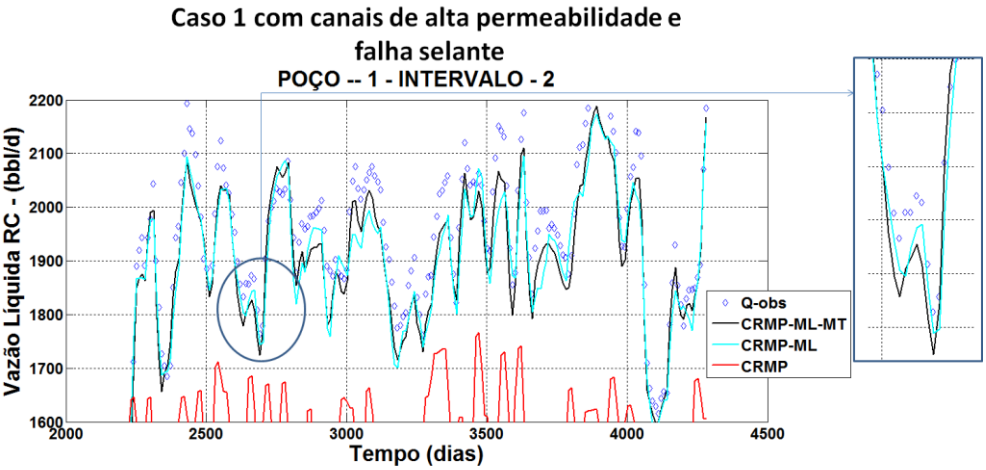


Fonte: A autora

As mesmas análises realizadas nos casos anteriores podem ser feitas neste caso, ou seja, no primeiro intervalo da simulação, que inicia com P-2 fechado, a vazão líquida de produção de P-1 tem como média 700bbl/dia.

No segundo intervalo, quando P-3 é também fechado, a vazão de P-1 aumenta para uma média de 1900bbl/dia, conforme mostra a Fig. 57 a seguir.

Figura 57 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas.

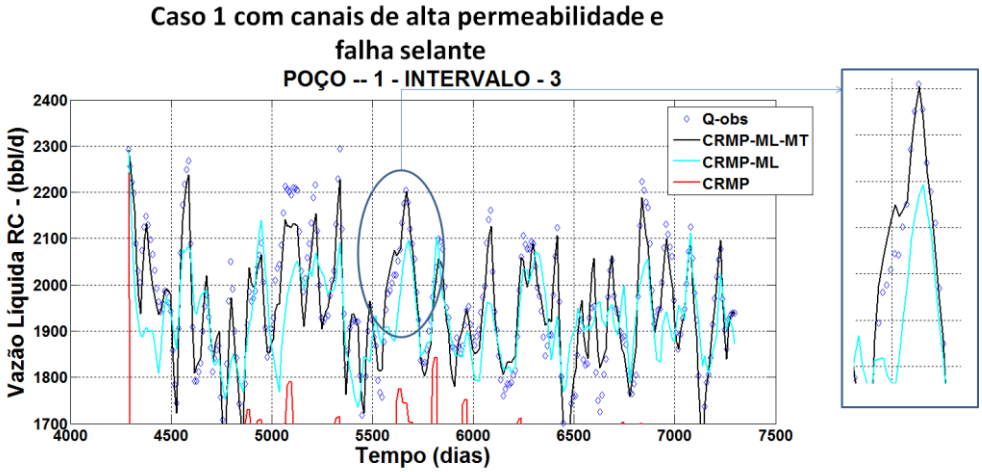


Fonte: A autora

Isso ocorre porque o fluxo de I-3, o qual durante o primeiro intervalo era dividido entre P-3 e P-1, que são os poços produtores localizados do mesmo lado da falha, com o fechamento de P-3 passa a ser direcionado apenas para P-3.

A Fig. 58 representa as curvas do fluxo líquido de P-1 no terceiro intervalo, o qual se mantém em 1900bbl/dia, como no intervalo 2.

Figura 58 - Comparação do ajuste das curvas das vazões líquidas calculadas e observadas.



Fonte: A autora

Esse último exemplo repete o comportamento do caso 1 com falha, pois a presença da mesma divide o reservatório em 2 compartimentos, e o poço P-1 e P-2 estão localizados nos compartimentos opostos da falha. Por essa razão, como no exemplo mencionado acima, os efeitos de mudança nas condições de P-2 não causam efeitos na vazão de P-1, conforme ficou mostrado no resultado apresentado.

Dos três exemplos estudados, onde a simulação envolve um reservatório com múltiplas camadas, com heterogeneidades e ainda abertura e fechamento de poços durante a produção, pode-se então observar que os modelos CRM-ML e CRM-MLMTC, aliando o cálculo dos parâmetros por intervalo de tempo ao cálculo dos mesmos também por camada do reservatório, promovem um grande incremento na qualidade dos resultados dos parâmetros calculados do modelo CRM, tornando seus resultados bem mais realistas quando comparados aos resultados de CRMP.

Esses exemplos mostram a importância do cálculo dos parâmetros de forma dinâmica, acompanhando a evolução da simulação com o tempo. Também nesses três casos, o CRM-MLMT foi o método que apresentou o melhor ajuste entre os três métodos comparados.

5.2 MODELO BRUSH CANYON OUTCROP (BCO) MODIFICADO.

O modelo sintético Brush Canyon Outcrop (BCO) foi apresentado por Oliveira, (2006). Este modelo é amplamente utilizado em estudos de pesquisa na UFPE por Horowitz et al., (2013); Oliveira, (2013); Pinto, (2014), Tueros et al, (2015), Rezende, (2016). As caraterísticas principais do modelo BCO estão apresentadas na Tabela 19 a seguir:

Tabela 19 - Características do modelo BCO

Malha de simulação (IJK)	43x55x6
Porosidade	16-28%
Permeabilidade horizontal	157-2592 mD
Permeabilidade vertical	30% of k_h
Viscosidade	0.11 cP
GOR	78.1 m^3 / *m3 std*

O modelo usado nesse estudo foi o BCO modificado. Foi realizada com o mesmo uma simulação onde houve conversão de um poço produtor em injetor, e foram calculadas as conectividades entre os pares de poços produtores e injetores antes e após a conversão do poço.

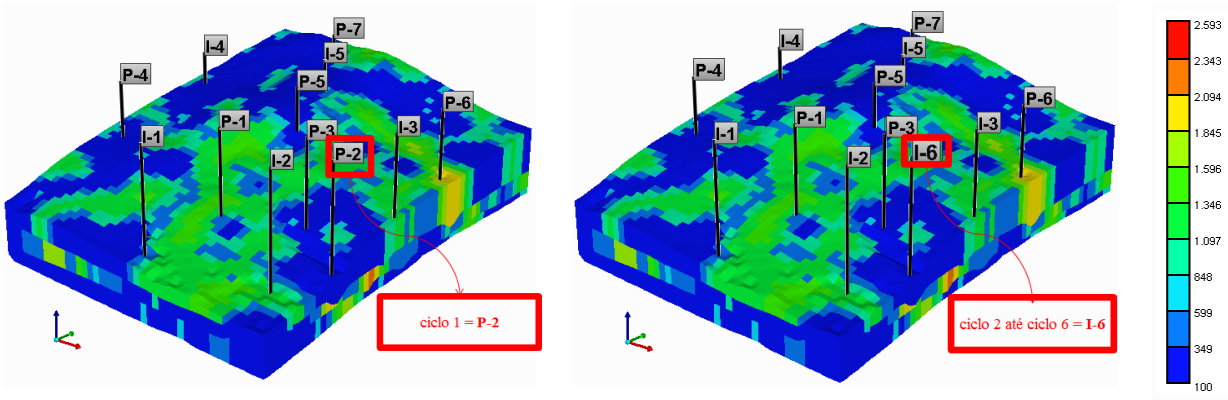
A conversão, ou reaproveitamento do poço, pode ser realizada como uma solução para um poço produtor que alcance um alto corte de água de forma prematura para o tempo de concessão, tornando-se economicamente inviável. Rezende, (2016) utilizou esse modelo no seu estudo do gerenciamento de reservatórios de petróleo visando desenvolver um processo para o reaproveitamento dos poços produtores que são diagnosticados como fechados (sem produzir) antes de terminar o tempo de concessão de um reservatório.

O modelo tem um total de 12 poços, os quais, no primeiro ciclo estão distribuídos em 7 poços produtores e 5 poços injetores. Do segundo ciclo em diante, quando é realizada a

conversão do poço produtor P-2 no injetor I-6, passa a ser 6 poços produtores e 6 poços injetores.

A Fig. 59 mostra o modelo BCO antes e depois da conversão do poço, e o seu mapa de permeabilidade.

Figura 59 Modelo BCO com conversão do poço produtor a partir do ciclo 2 até o ciclo 6 - (a) primeiro ciclo (b) do segundo ciclo em diante (até o sexto) (c) Mapa de permeabilidade na direção I



(a) (b) (c)

Fonte: IMEX

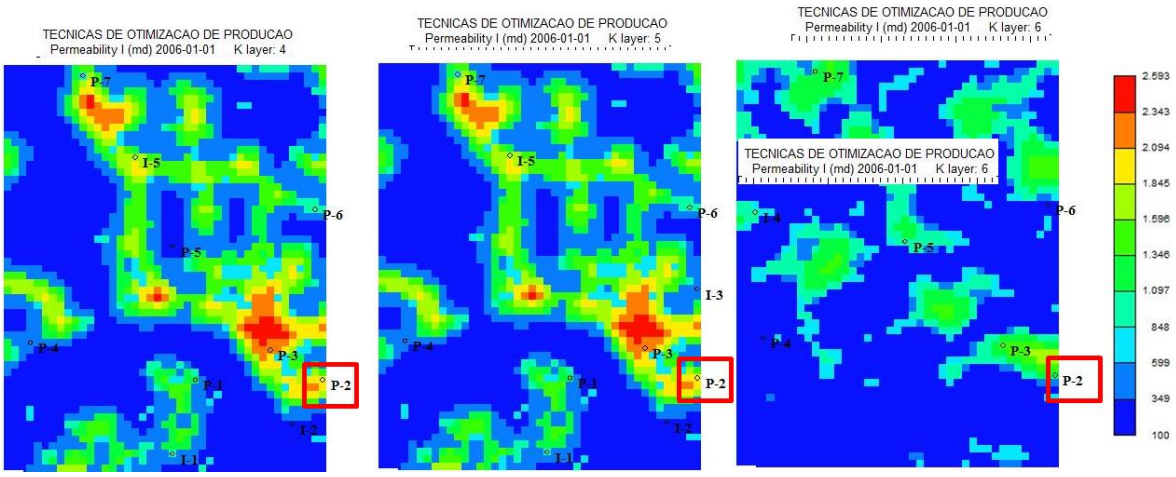
O BCO é composto por 6 camadas, sendo os poços completados de diferentes formas nas mesmas, como se pode observar na tabela 20 a seguir.

Tabela 20 – Completações do modelo BCO.

COMPLETAÇÕES DOS POÇOS PRODUTORES		COMPLETAÇÕES DOS POÇOS INJETORES	
PRODUTOR	**CAMADA (α)**	**INJETOR**	**CAMADA (α)**
P1	2, 3, 4,5	I1	4, 5
P2	4, 5, 6	I2	2, 4, 5
P3	4, 5, 6	I3	5
P4	4, 5, 6	I4	6
P5	4, 6	I5	4, 5, 6
P6	4, 5, 6	I6	4, 5, 6
P7	4, 5, 6		

A Fig. 60 a seguir mostra as camadas nas quais o poço P-2 está completado, e seus respectivos mapas de permeabilidade.

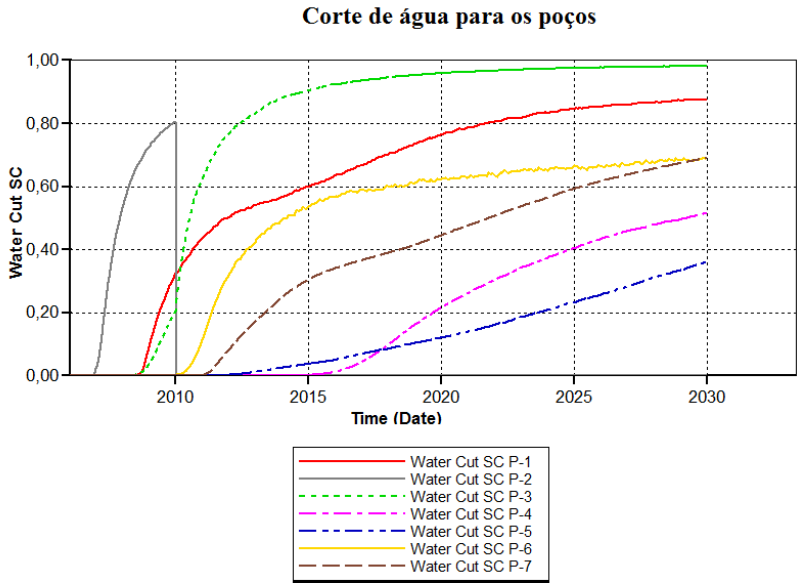
Figura 60 - Perfil da permeabilidade nas camadas 4, 5 e 6, nas quais P-2 está completado, e mapa de permeabilidade.



Fonte: A autora

O poço P-2 foi escolhido para ser convertido em um injetor, pois ao término do primeiro intervalo, o mesmo apresenta um alto corte de água, 80%, sendo o maior corte de água entre os produtores, conforme pode ser visto na Fig. 61 a seguir:

Figura 61 – Corte de água dos poços produtores durante a simulação.



Fonte: IMEX

A linha cinza mostra o corte de água do poço P-2. Observa-se que no ano 2010, após 4 anos de simulação, a qual iniciou em 2006, o poço P-2 apresentava um alto valor de corte de água em relação aos outros produtores.

Isso pode ser explicado devido a sua localização, conforme pode ser visto na Fig. 60. Pode-se observar que nas três camadas em que o poço produtor P-2 está completado, ele se encontra em uma região de alta permeabilidade. Além disso, na camada 4, o injetor I-2 encontra-se muito próximo a ele, e ainda, na camada 5, além do I-2 tem também o I-3. A alta zona de permeabilidade e a proximidade aos dois injetores direcionam para esse produtor um grande volume de água.

A conversão do poço produtor em um novo poço injetor representa uma mudança brusca para o fluxo dos fluidos no reservatório, e irá impactar nas conectividades entre os pares de poços produtor/injetor. Além disso, as conectividades que existiam entre os injetores e o poço produtor que sofre a conversão e deixa de ser produtor, deixam de existir, enquanto novas conectividades irão surgir entre o novo poço injetor e os demais poços produtores.

Devido a essas mudanças provocadas pela conversão do poço, os parâmetros do CRM devem ser calculados de forma dinâmica, pois haverá uma grande mudança dos parâmetros antes e após a conversão. Ainda, mesmo após a conversão, o reservatório passa por um período no qual as conectividades vão se reestabelecendo, sofrendo mudanças enquanto o fluxo dos fluidos volta a uma condição de estabilidade.

Por esse motivo, os resultados da simulação são divididos em intervalos de tempo, e os parâmetros do CRM foram calculados em cada um deles. Dessa forma, é possível capturar as condições do reservatório e suas conectividades antes da conversão, e após a mesma, acompanhando suas modificações ao longo do tempo.

Para esse estudo, o cálculo dos parâmetros foi realizado através de um CRMP dinâmico (CRMP-D), ou seja, foi utilizado o clássico CRMP, considerando o reservatório como uma única camada, porém os parâmetros foram determinados de forma dinâmica, isto é, variando ao longo do tempo.

A simulação realizada tem um tempo total de 24 anos e após os 4 primeiros anos foi realizada a conversão do poço produtor P-2 em um novo poço injetor I-6. A realização do

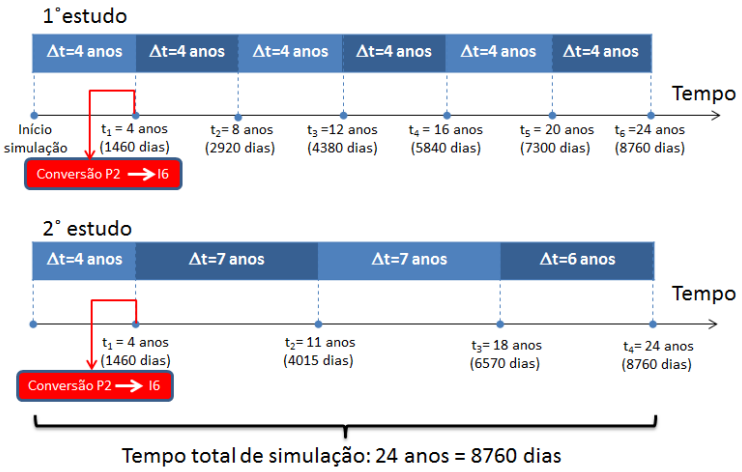
controle do BHP dos produtores foi gerada aleatoriamente dentro do intervalo [100, 115] kg/cm^2, assim como da vazão dos injetores no intervalo [1300,1700] m^3/dia.

Para determinar os parâmetros após a conversão, dois estudos foram realizados, sendo a diferença entre eles o número de intervalos no qual os 20 anos restantes da simulação foram divididos. No primeiro estudo, esses 20 anos foram divididos em cinco intervalos, e no segundo em três.

Portanto, no primeiro estudo, temos um total de 6 intervalos, sendo o primeiro antes da conversão, seguido de mais cinco intervalos após a conversão. Já no segundo estudo temos um total de 4 intervalos, o primeiro mais três após a conversão. Com os dados da simulação separados por intervalo de tempo, os parâmetros do CRM são calculados para cada um deles.

A divisão da simulação em intervalos, para os dois estudos, está mostrada na Fig. 62 a seguir:

Figura 62 - Divisão da simulação em intervalos de tempo.



Fonte: A autora

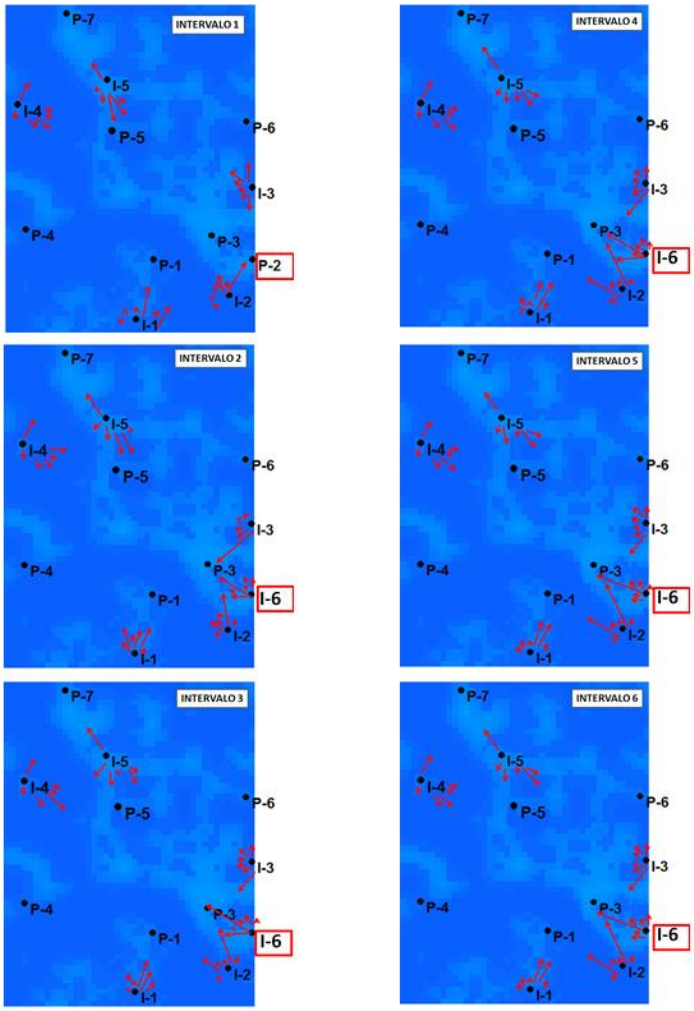
Durante a realização dos cálculos das conectividades, foi observado que devido a grande perturbação que a conversão do poço provoca no reservatório, os resultados da simulação, imediatamente após a conversão do poço, provocam grandes desvios nos resultados das conectividades calculadas.

Para obter uma melhora na qualidade dos resultados dos parâmetros, foi necessário abrir uma janela nos resultados da simulação. Os primeiros 600 resultados das vazões de

produção após a conversão, informados pelo simulador, não foram utilizados, pois se percebeu que eles estavam prejudicando significativamente os resultados dos parâmetros calculados. Isso porque durante este período o reservatório está sofrendo uma drástica reestabilização das condições do fluxo dos fluidos no seu interior devido ao processo de conversão. Além disso, analisando-se os resultados das constantes de tempo, percebe-se que nesse período o novo injetor ainda não causou efeito nas vazões de todos os produtores, portanto os resultados dos parâmetros não podem ser bem determinados durante o mesmo.

Na Fig. 63 a seguir, pode-se observar a variação das conectividades calculadas no primeiro estudo, nos 6 intervalos de tempo, através das setas. Os resultados das conectividades podem ser encontrados no apêndice E.

Figura 63 - Conectividades do modelo BCO para a simulação em 6 intervalos.



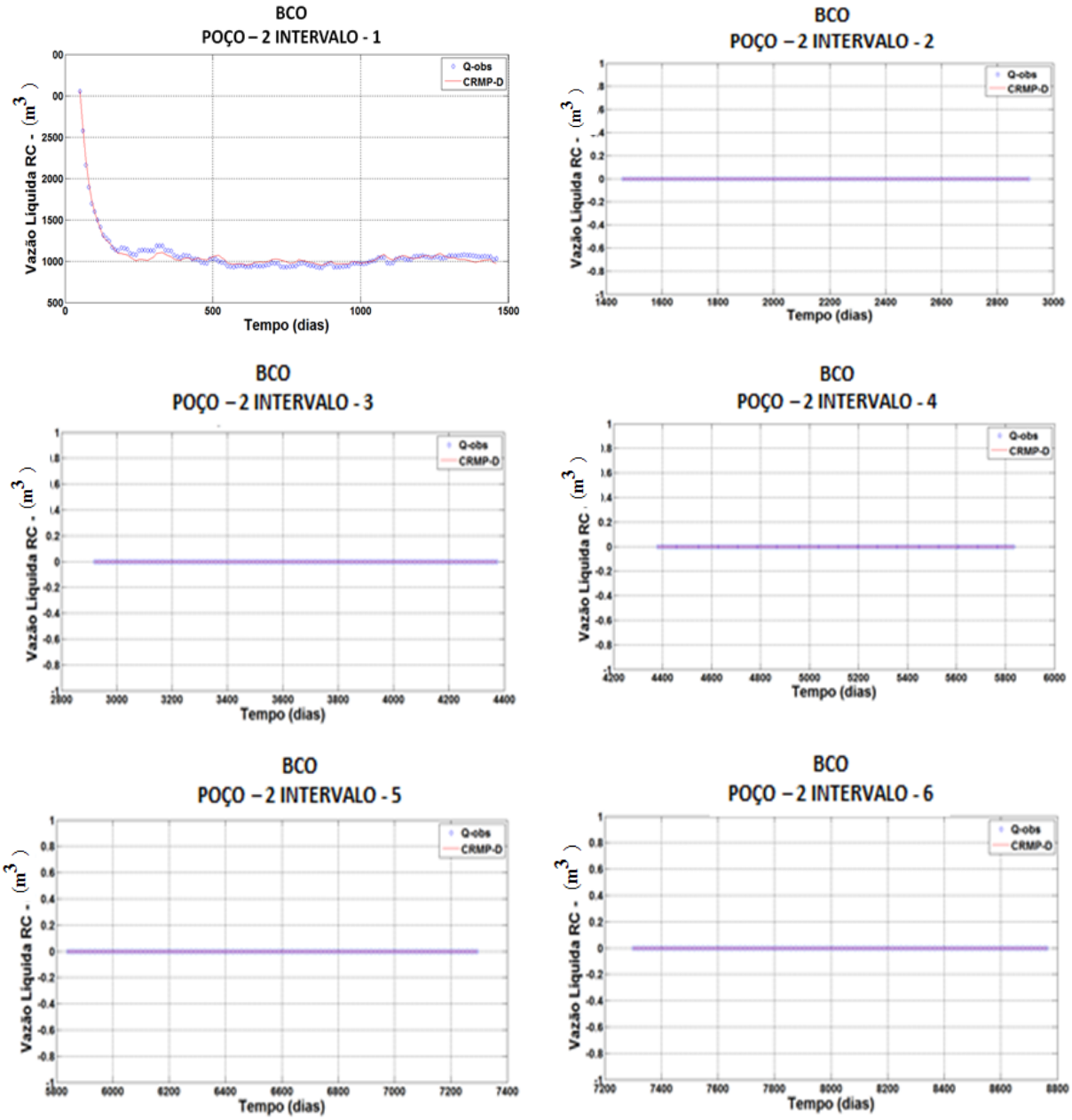
Fonte: A autora

Pode-se perceber que, como esperado, há uma grande mudança das conectividades do primeiro para o segundo intervalo, quando há a conversão do poço P-2 para I-6. Após a conversão, ou seja, a partir do segundo intervalo, percebe-se que novas conectividades se estabelecem. Essas conectividades vão sofrendo modificações em seus valores enquanto o reservatório vai reestabelecendo as condições do fluxo dos fluidos no seu interior. Analisando a Fig. 63, pode-se perceber que a partir do intervalo 4, as conectividades já vão se estabilizando, sofrendo pequenas alterações até o final do tempo de produção.

Em posse dos valores dos parâmetros do CRMP-D, foram calculadas as vazões de produção líquida através de suas equações e plotados os gráficos para analisar o ajuste entre as curvas das vazões líquidas calculadas e observadas.

A seguir, na Fig. 64, podem-se observar os gráficos dos 6 intervalos, realizados para o poço P-2, no qual é realizada a conversão.

Figura 64 - Gráficos do ajuste entre as curvas das vazões líquidas de produção calculadas e observadas, nos 6 intervalos da simulação, para o produtor P-2.

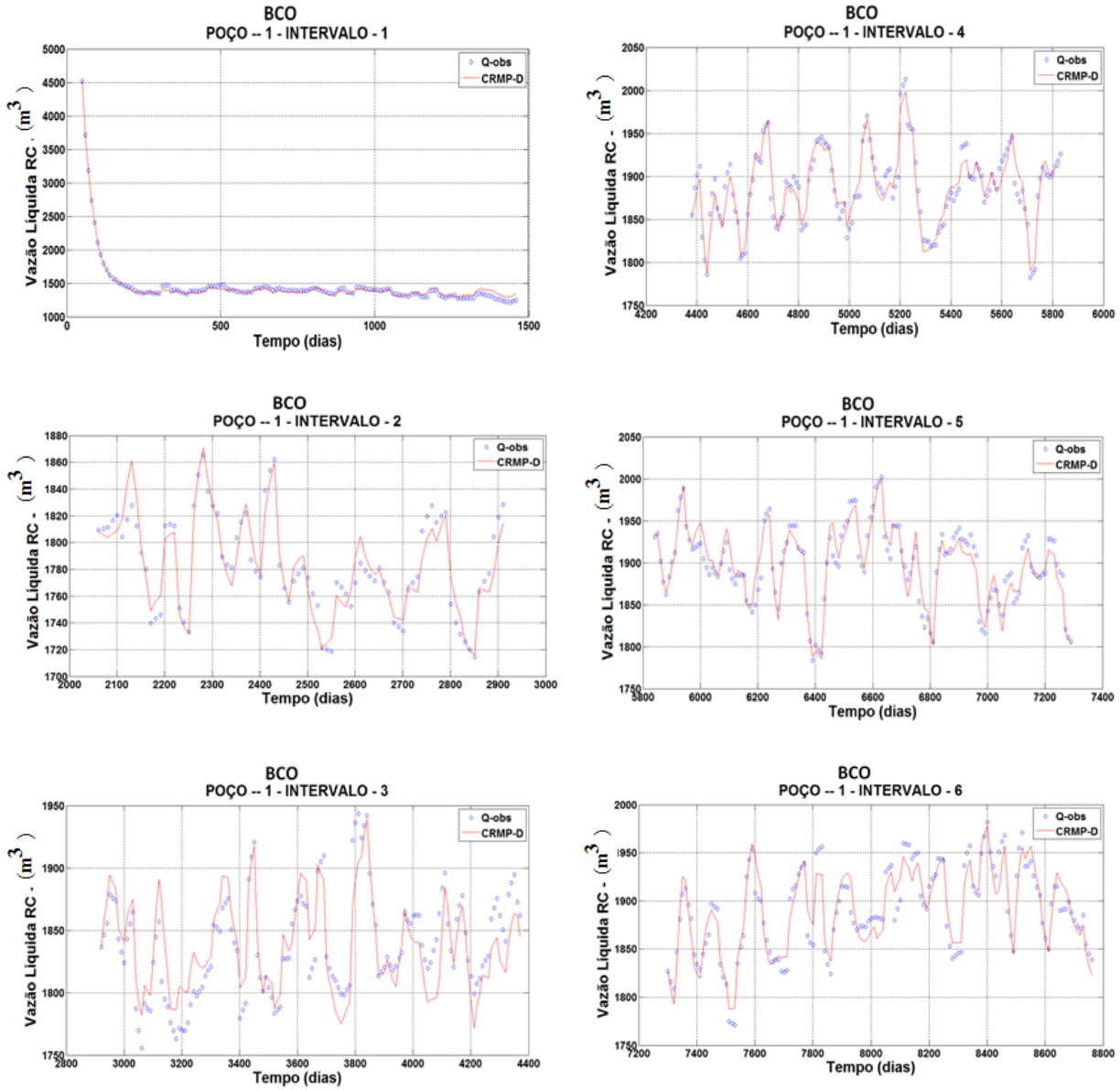


Fonte: A autora

A análise dos gráficos mostra que o primeiro intervalo tem um bom ajuste entre as curvas da vazão calculada e observada, e a partir do segundo intervalo o poço para de produzir, devido a sua conversão em um poço injetor.

Na Fig. 65 a seguir pode-se observar o ajuste entre as curvas da vazão líquida de produção calculada e observada do poço produtor P-1, que é vizinho a P-2, e, portanto, sofre diretamente os efeitos da conversão.

Figura 65 - Gráficos do ajuste entre as curvas das vazões líquidas de produção calculadas e observadas, nos 6 intervalos da simulação.



Fonte: A autora

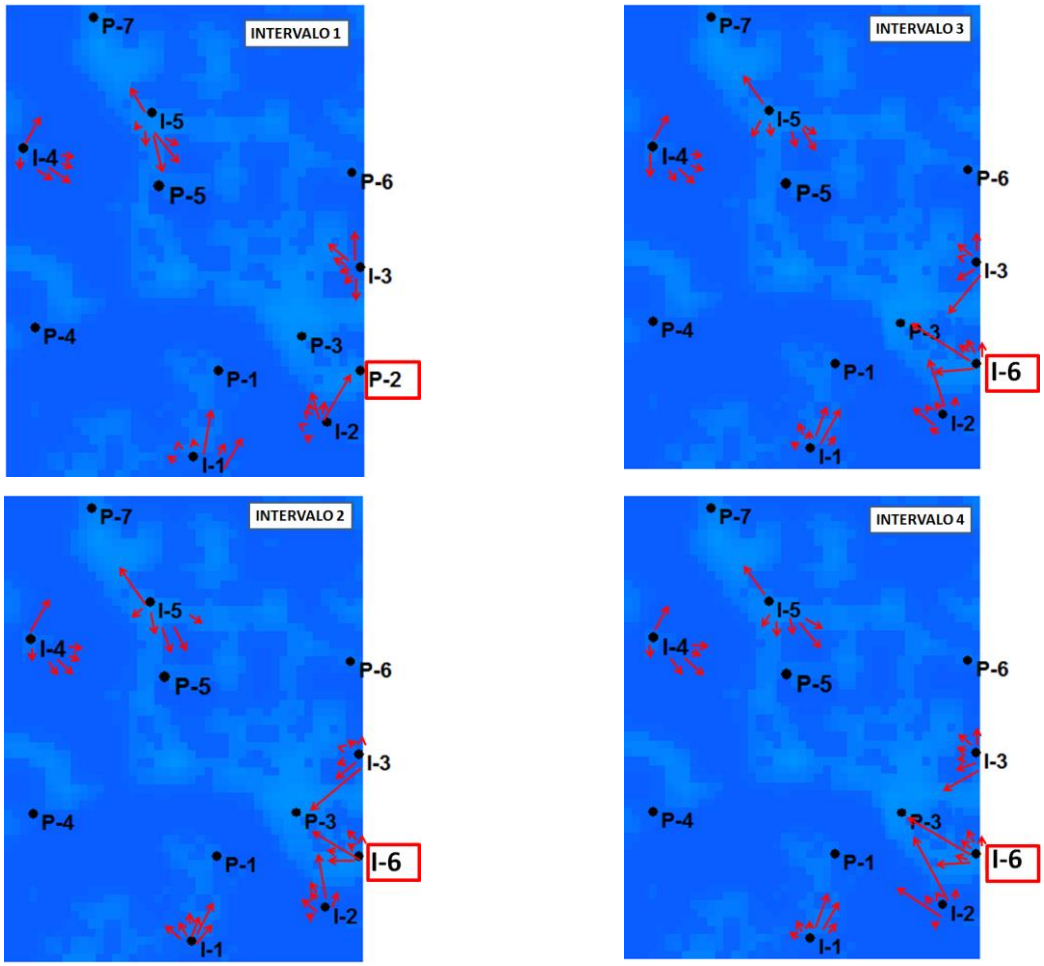
Analisando os gráficos dos ajustes entre as curvas das vazões de produção líquida calculadas e observadas do P-1, pode-se perceber que o primeiro intervalo tem um bom ajuste entre os dados calculados e observados. No segundo intervalo, logo após a conversão, assim como no terceiro, observa-se que a curva dos dados calculados acompanha a tendência da curva dos dados observados, porém as curvas se distanciam um pouco. A partir do quarto intervalo as curvas vão voltando a se aproximar, melhorando o ajuste entre elas nos intervalos seguintes.

Esse resultado mostra que durante o período que abrange o segundo e o terceiro intervalo, o reservatório está reestabelecendo o fluxo dos fluidos no seu interior, devido à conversão do poço, que causa uma mudança de grande impacto nas condições de estabilidade do mesmo. Esse período de maior instabilidade gera desvios nos resultados das conectividades, o que se reflete na qualidade do ajuste das curvas.

Pode-se perceber também que há um aumento gradativo na vazão de produção deste poço, que passa de uma média de 1500 m^3/dia, no primeiro intervalo, para uma média de 1900 m^3/dia, no sexto intervalo. Isso se deve a conversão do seu poço vizinho, que para de produzir e passa a injetar água.

Na Fig. 66 a seguir, estão mostradas as conectividades encontradas no segundo estudo, no qual a simulação foi dividia em 4 intervalos de tempo.

Figura 66 Conectividades do modelo BCO para a simulação em 4 intervalos.



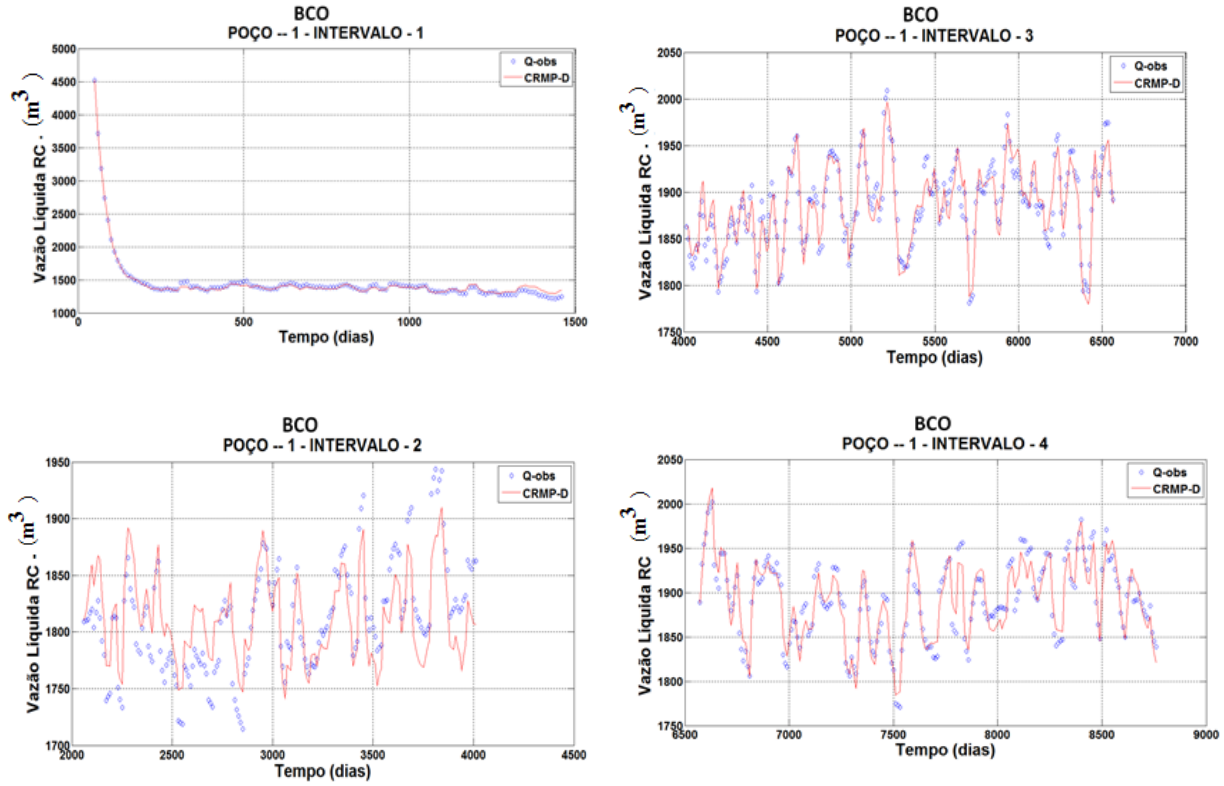
Fonte: A autora

Nesse segundo estudo, como no primeiro, é possível também perceber que após a conversão há um rearranjo das conectividades entre os pares de poços produtores e injetores, devido à conversão do poço. Verifica-se novamente que os valores das conectividades vão mudando enquanto o reservatório vai reestabelecendo as condições do fluxo dos fluidos no seu interior.

Neste segundo estudo, porém, percebe-se a mudança do intervalo 1 para o 2, mas a partir do intervalo 3 as conectividades já vão se estabilizando, sofrendo pequenas alterações do intervalo 3 para o intervalo 4.

A Fig. 67 a seguir mostra os gráficos dos quatro intervalos, novamente para o P-1.

Figura 67 - Gráficos do ajuste entre as curvas das vazões líquidas calculadas e observadas.



Fonte: A autora

Analisando os gráficos, pode-se perceber, da mesma forma que no primeiro estudo com 6 intervalos, que o primeiro intervalo mostra um bom ajuste entre as curvas dos dados observados e calculados.

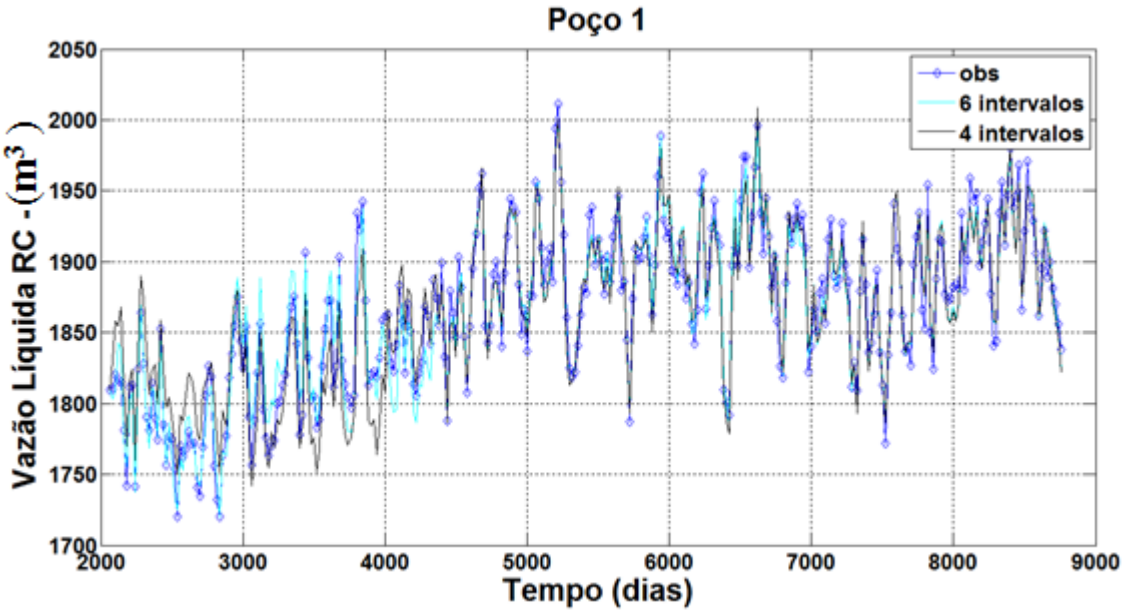
A mesma observação feita no primeiro estudo, para o intervalo 2, pode ser feita para este estudo, ou seja, logo após a conversão, observa-se que a curva dos dados calculados acompanha a tendência da curva dos dados observados, porém as curvas se distanciam um pouco.

Ainda, verifica-se que, nesse segundo estudo, a partir do intervalo 3, já é possível observar as curvas das vazões calculadas e observadas se aproximarem, mostrando novamente um bom ajuste nos intervalos 3 e 4. Como no segundo estudo os intervalos são mais longos,

nesse caso, então, o segundo intervalo abrange o tempo em que o reservatório reestabelece a estabilização do fluxo dos fluidos.

A Fig. 68 que segue, mostra uma comparação entre as curvas dos dados observados da vazão líquida de produção do poço P-1 e calculados, utilizando os parâmetros do CRMP-D do primeiro e do segundo estudo, com 6 e 4 intervalos de tempo, respectivamente, a partir da conversão do poço até o término da simulação.

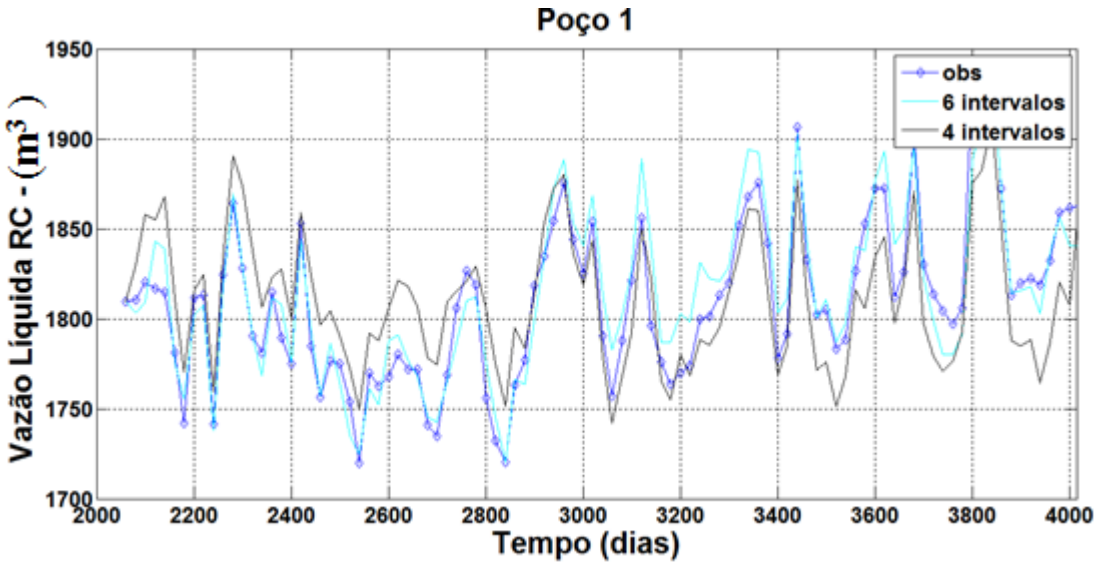
Figura 68 - Comparação entre as curvas das vazões observadas e calculadas com os parâmetros determinados a partir do estudo com 6 intervalos e com 4 intervalos.



Fonte: A autora

Dividindo o gráfico em intervalos menores, observa-se pela Fig. 69 a seguir que desde o momento da conversão até aproximadamente os 4000 dias, que representa o final do terceiro intervalo do primeiro estudo e final do segundo intervalo do segundo estudo, a curva das vazões calculadas no primeiro estudo se aproxima mais da curva das vazões observadas do que a curva das vazões calculadas no segundo estudo.

Figura 69 - Comparação entre as curvas das vazões observadas e as curvas das vazões calculadas com os parâmetros determinados a partir do estudo com 6 intervalos e com 4 intervalos, nos primeiros 4000 dias



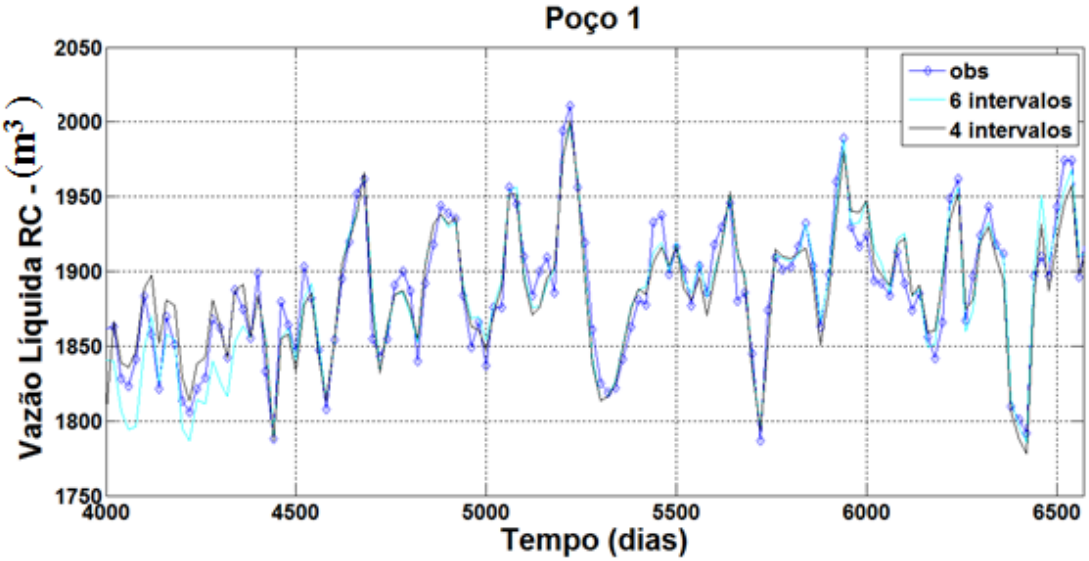
Fonte: A autora

Como o primeiro estudo divide a simulação em mais intervalos, os parâmetros calculados conseguem detectar melhor as características do fluxo em cada um deles. O gráfico da Fig. 69 representa o período após a conversão durante o qual o reservatório está passando por um processo de estabilização das suas condições de fluxo. No primeiro estudo, este período abrange dois intervalos, o 2 e o 3, enquanto no segundo estudo apenas um intervalo, o 2.

Como o primeiro estudo divide esse período de estabilização em 2 intervalos, ele consegue capturar com mais acurácia a dinâmica das transformações que estão ocorrendo no reservatório, que são traduzidas pelas conectividades calculadas pelo CRMP-D.

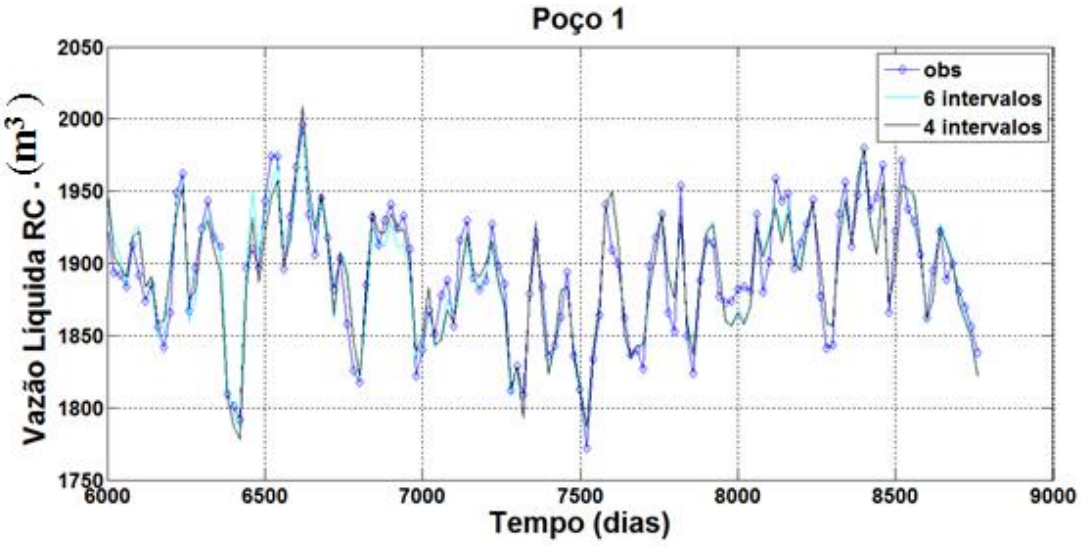
Observando a Fig. 70, para um período posterior, dos 4000 aos 6500 dias, percebe-se que as curvas dos dois estudos estão muito próximas, praticamente se sobrepondo uma a outra. O mesmo pode ser observado para o último gráfico, mostrado na Fig. 71, dos 6500 dias até o fim da simulação.

Figura 70 - Comparação entre as curvas das vazões observadas e calculadas com os parâmetros determinados a partir do estudo com 6 intervalos e com 4 intervalos, dos 4000 aos 6500 dias.



Fonte: A autora

Figura 71 – Comparação entre as curvas das vazões observadas e as curvas das vazões calculadas com os parâmetros determinados a partir do estudo com 6 e com 4 intervalos, dos 6500 dias até o final da simulação.



Fonte: A autora

Portanto, após o período de estabilização, ou seja, a partir dos 4000 dias aproximadamente, mesmo o reservatório ainda tendo um comportamento dinâmico, os intervalos do segundo estudo, ainda que maiores que o do primeiro, já conseguem capturar bem o comportamento do reservatório.

Outra verificação realizada para a comparação dos dois estudos foi o cálculo do volume de líquido (água + óleo) acumulado, produzido pelo reservatório, no período após a conversão até o final da simulação. Calculou-se o volume produzido a partir das vazões observadas e das vazões calculadas para cada um dos estudos, com 6 e 4 intervalos. Na tabela 21 a seguir estão os resultados.

Tabela 21- Comparação da produção acumulada de líquido do reservatório.

N° de intervalos	Observado (m^3)	Calculado (m^3)	Erro (%)
6	6,2836E+7	6,2830E+7	9,2102E-03
4	6,2836E+7	6,2829E+7	1,0869E-02

Analisando os resultados verifica-se que para os dois estudos os valores obtidos foram muito próximos e também o erro em relação aos dados observados foi pequeno, mostrando que o segundo estudo, com 4 intervalos, já retorna valores eficientes das conectividades.

Pode-se então concluir que a quantidade de intervalos do segundo estudo já seria suficiente para obtenção de bons resultados das conectividades para esse problema utilizando o modelo BCO. Como foi discutido, no primeiro intervalo após a conversão do poço produtor P-2 em injetor I-6, o primeiro estudo teve um ajuste de curvas melhor quando comparados ao segundo estudo, porém, os resultados do segundo estudo já foram bastante satisfatórios, envolvendo menos variáveis e menor tempo de simulação que o primeiro.

Para os dois estudos, o tempo necessário para a estabilização do fluxo no reservatório após a conversão foi de aproximadamente 7 anos, o que representa 35% do tempo entre a conversão do poço e o final da simulação.

Desses dois estudos, conclui-se que para um problema envolvendo conversão de poços, o cálculo dos parâmetros do modelo CRM tem que ser realizados de forma dinâmica, devido as grandes mudanças que o fluxo dos fluidos sofre durante a simulação. O modelo

CRMP-D mostrou bons resultados, e recomenda-se que o tempo após a conversão seja dividido em intervalos com pelo menos 35% do tempo da conversão até o fim da simulação.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho foram propostas três estratégias do CRM para o cálculo das conectividades em reservatórios que apresentam heterogeneidades significativas entre suas camadas e que envolvam eventos de abertura e fechamento de poços durante seu período de produção, são elas: CRMP, CRM-ML e CRM-MLMTC. Os resultados obtidos para as conectividades de um reservatório utilizando as três estratégias foram então comparados.

Foi também proposta mais uma estratégia, o CRMP-D, que é o CRMP dinâmico, utilizado nessa dissertação para um problema envolvendo conversão de um poço produtor para injetor.

6.1 CONCLUSÕES

Dos exemplos realizados utilizando essas estratégias, pode-se concluir que:

- Quando o modelo CRMP, que considera o reservatório com uma única camada, é aplicado a modelos heterogêneos, sua acurácia é comprometida. Além disso, se durante a simulação ocorre abertura ou fechamento de poços produtores, o ajuste do modelo, que considera os parâmetros constantes durante toda a simulação, tem um grande desvio dos dados observados, porque ele não leva em consideração tais mudanças durante a simulação.
- O CRM-ML e CRM-MLMTC são modelos do CRM que incorporam a divisão do reservatório em camadas e a divisão do tempo da simulação em intervalos. Quando ocorrem eventos de mudanças na condição de abertura e fechamento dos poços produtores, eles recalculam os parâmetros do modelo considerando poços que passaram ou deixaram de ser ativos. Dessa forma alcançam resultados bem mais próximos do modelo real do reservatório do que o cálculo pelo típico CRMP. Podemos observar tais melhorias nas estratégias do CRM-ML e CRM-MLMTC através dos gráficos de ajuste das curvas das vazões calculadas por esses modelos e a curva das vazões observadas. As curvas do ML e MLMTC, principalmente deste último, tem um ajuste muito mais preciso do que a curva do CRMP, detectando as heterogeneidades do reservatório e as mudanças das conectividades ao longo da evolução da simulação.
- Os modelos CRM-ML E CRM-MLMTC mostraram uma sensível capacidade de detectar heterogeneidades no reservatório, o que é de grande importância, pois em posse de dados

reais de campo, que existem disponíveis em grande quantidade, podemos através das conectividades capturar características geológicas de um reservatório, com um baixo custo econômico e também computacional.

- O CRM-ML calcula as conectividades por camada e com isso mostra grande aprimoramento nos resultados em relação ao CRMP. O CRM-MLMTC, por sua vez, calcula todos os parâmetros por camada e não apenas as conectividades. Dessa forma, mostra resultados próximos ao CRM-ML, porém, ainda mais precisos em relação aos dados observados. A vantagem de usar o CRM-ML em relação ao CRM-MLMTC é ter um método um pouco mais simples, porém, já sofisticado, e com o número de parâmetros menor com resultados significativamente melhores que os métodos tradicionais do CRM existentes na literatura.
- É de grande importância um modelo no qual as mudanças de abertura e fechamento dos poços são introduzidas ao modelo do cálculo dos parâmetros, principalmente para casos de grandes campos onde produtores são abertos e fechados ao longo do tempo de produção.
- Um ponto importante a ser levantado é que o sucesso do modelo depende muito da disponibilidade dos dados, como, por exemplo, a injeção por camada, pois são dados de entrada necessários para o desenvolvimento da estratégia proposta.
- A conversão de poços é um problema que envolve uma mudança brusca nas condições de estabilidade do reservatório, e para o cálculo das conectividades após a conversão deve-se utilizar uma janela nos dados. Para isso, os primeiros dados da simulação após a conversão devem ser desprezados, pois causam desvios nos resultados obtidos para as conectividades.
- O modelo CRMP-D mostrou bons resultados, e recomenda-se que o tempo após a conversão seja dividido em intervalos com pelo menos 35% do tempo da conversão até o fim da simulação.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos estudos desenvolvidos seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de um método baseado nos modelos de Capacitância e Resistência, CRM-ML e CRM-MLMTC, no qual a vazão de injeção conhecida é a total de cada poço injetor. Os modelos CRM-ML e CRM-MLMTC necessitam como dados as vazões de injeção por camada. Caso não se tenha esses dados disponíveis, eles precisam ser determinados, e as

frações da injeção total que são direcionadas para cada camada passam a ser mais um parâmetro a ser determinado pela otimização.

- Utilização dos parâmetros do CRM como modelo substituto para previsões futuras das vazões de produção dos poços produtores de um reservatório e otimização do valor presente líquido (VPL).

REFERÊNCIAS

Albertoni, A., Lake, L., 2003. Inferring interwell connectivity only from well-rate fluctuations in waterfloods. *SPE Reserv. Eval. Eng* 6(1), 6-16.

Arora, J.,S., Introduction to Optimum Design, Second Edition, Academic Press, San Diego, 2004.

Cao, F., Luo, H., Lake, L. W., 2014. Development of a Fully Coupled Two-phase Flow Based Capacitance Resistance Model (CRM). *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/169485-MS.

Computer Modeling Group LTD., 2016. IMEX: User´ s Guide. Calgary Canada.

Drud, A.S., 1992. CONOPT: A Large-Scale GRG Code. *ORSA Journal on Computing*, **6**:207-216. Dykstra, H. and Parsons.

Evensen, G., 2003. The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation. Ocean Dyn. 53 (4), 343–367.

Fragio, M., Lacivita A., Valle, J., Marzano M., 2017. Integrating a Data Driven Model into a Multilayer Pattern Waterflood Simulatior. *Paper SPE*-184908-MS.

Gentil, P., 2005. The Use of Multilinear Regression Models in Patterned Waterfloods: Physical Meaning of the Regression Coefficients, M.S. Thesis, The University of Texas at Austin, August, 2005.

Holanda, R. W., Gildin, E., Jensen, J. L., 2015. Improved Waterflood Analysis Using the Capacitance-Resistance Model Within a Control Systems Framework. *Society of Petroleum Engineers*. doi:10.2118/177106-MS.

Horowitz, B., Bastos Afonso. S. e Paiva de Mendoça, 2013. C. Surogate based optimal waterflooding management. Journal of Petroleum Science an Engineering (2013), Vol. 112, pp. 206-219.

Jafroodi, N. and Zhang D., 2011, New method for reservoir characterization and optimization using CRM–EnOpt approach, Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 77, Issue 2, 2011, Pages 155-171, ISSN 0920-4105,https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.02.011.

Liang, X., 2010. A simple model to infer interwell connectivity only from well-rate fluctuations in waterfloods. Journal of Petroleum Science and Engineering - J PET SCI ENGINEERING. 70. 35-43. 10.1016/j.petrol.2009.08.016.

Lie, K.-A, 2016.. An introduction to reservoir simulation using MATLAB: User guide for the Matlab Reservoir Simulation Toolbox (MRST). SINTEF ICT, December 2016, https://www.sintef.no/Projectweb/MRST/Publications.

MATLAB'S Optimization Toolbox User's Guide, R2014a.

Moreno, G., 2013. Multilayer Capacitance-resitance model with dynamics connectivities. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 109,August 2013, Pages 296-307, ISSN 0920-4105, http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2013.08.009.

Nguyen, Anh Phuong, 2012. Capacitance Resistance Modelling for primary recovery, waterflooding and water-CO_2 flood. Ph.D. dissertation, The University of Texas at Austin. 2012.

OLIVEIRA, L. C., 2013. *Estratégia Híbrida Aplicada ao Gerenciamento Ótimo de Reservatórios.* Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE.

PINTO, 2014. Uso de Otimização Sequencial Aproximada em Problemas Uni e Mutiobjetivos de Gerenciamento de Reservatórios. Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE.

Rezende, C. S., 2016. Otimização da Conversão de Poços em Reservatórios de Petróleo. Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE.

Sayarpour, M, 2008. *Development and Application of Catacitance-Resistive Model to water/Co_2 floods.* PhD Dissertation. The Univesrity of Texas at Austin, Austin, Texas

Sayarpour, M., Zuluaga, E., Kabir, C. S., Lake, L. W.,2009. The use of capacitance-resistive models for rapid estimation of waterflood performance and optimization, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 69 (3-4):227-238. http://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.09.006.

Tueros, J.A.R., Horowitz, B and Willmersdorf, R., 2015. NUMERICAL EXPERIENCE WITH AN ENSEMBLE-BASED METHOD FOR CONSTRINED WATERFLOONDING OPTIMIZATION, CILAMCE 2015, XXXVI Congresso Ibero Americano em Métodos Computacionais em Engenharia, Rio Janeiro, RJ, 22-25, Novembro 2015.

Weber, D., 2009. The Use of Capacitance-Resistance Models to Optimize Injection Allocation and Well Location in Water Floods. Ph.D dissertation, The University of Texas at Austin. 2009.

Weber, D.B., Edgar, T.F., Lake, L.W., Lasdon, L.S., Kawas, S., and Sayarpour, M. 2009. Improvements in Capacitance-Resistive Modeling and Optimization of Large Scale Reservoirs. Paper SPE 121299 presented at the SPE Western Regional Meeting, San Jose, California, 24-26 March.

Yousef, A., 2006. Investigating Statistical Techniques to Infer Interwell Connectivity from Production and Injection Rate Fluctuations. Ph.D dissertation, The University of Texas at Austin, 2006.

Zhang, Z., Li, H.m, Zhang, D., 2015. Water Flooding Performance Prediction by Multi-Layer Capacitance-Resistive Models Combined With the Enemble Kalman filter, *Journal of*

Petroleum Science and Engineering, 108, July 2013 Pages 107-117 ISSN 0920-4105, http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2015.01.020.

APENDICE A - RESULTADOS DOS PARÂMETROS PARA O CASO 1 COM CANAIS DE ALTA PERMEABILIDADE

CRMP							
	I1	**I2**	**I3**	**I4**	**I5**	τ_j	J_j
P1	0,2375	0,2090	0,1101	0,0993	0,0997	10,9868	1,6248
P2	0,5098	0,2399	0,4080	0,4628	0,2554	8,5362	1,4076
P3	0,2141	0,5000	0,3367	0,1878	0,2299	11,0000	7,3806
P4	0,0386	0,0511	0,1452	0,2502	0,4149	15,7099	1,4076
SOMA	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000		

CRM-ML													
	Camada	I1	I1 - Média	I2	I2 - Média	I3	I3 - Média	I4-1	I4 - Média	I5-1	I5 - Média	τ_j	J_j
	$\alpha = 1$	0,0866		0,2216		0,0336		0,0097		0,1388			
P1	$\alpha = 2$	0,3053	0,2365	0,3067	0,1761	0,1707	0,1052	0,1514	0,1051	0,1049	0,1324	13,0980	1,6187
	$\alpha = 3$	0,3177		0,0000		0,1111		0,1542		0,1535			
	$\alpha = 1$	0,7727		0,5069		0,8755		0,8656		0,5224			
P2	$\alpha = 2$	0,2738	0,4044	0,1693	0,2254	0,2680	0,4120	0,3529	0,5095	0,3186	0,3253	9,0361	1,4111
	$\alpha = 3$	0,1666		0,0000		0,0924		0,3099		0,1350			
	$\alpha = 1$	0,0835		0,2348		0,0383		0,0000		0,0540			
P3	$\alpha = 2$	0,2619	0,2537	0,3367	0,5071	0,2718	0,3121	0,1800	0,1671	0,1698	0,2328	7,4267	9,5188
	$\alpha = 3$	0,4158		0,9498		0,6261		0,3211		0,4745			
	$\alpha = 1$	0,0572		0,0368		0,0526		0,1247		0,2848			
P4	$\alpha = 2$	0,1590	0,1054	0,1872	0,0914	0,2894	0,1708	0,3157	0,2184	0,4067	0,3095	0,0486	5,9481
	$\alpha = 3$	0,0999		0,0502		0,1703		0,2148		0,2370			

CRM-MLMTC															
	Camada	I1	I1 - Média	I2	I2 - Média	I3	I3 - Média	I4-1	I4 - Média	I5-1	I5 - Média	τ_j	τ_j - Média	J_i	J_j - Média
	$\alpha = 1$	0,1139		0,2145		0,0173		0,0102		0,0935		10,0033		1,4111	
P1	$\alpha = 2$	0,2918	0,2466	0,3099	0,1748	0,1464	0,0950	0,1319	0,1234	0,0773	0,1153	8,8427	14,8053	2,4178	1,7661
	$\alpha = 3$	0,3341		0,0000		0,1213		0,2283		0,1752		25,5697		1,4693	
	$\alpha = 1$	0,7509		0,4564		0,9219		0,8730		0,5333		8,2873		7,6285	
P2	$\alpha = 2$	0,2947	0,3968	0,1913	0,2234	0,2979	0,4424	0,3776	0,4900	0,3160	0,3241	13,2569	7,1814	2,1924	3,7440
	$\alpha = 3$	0,1447		0,0225		0,1073		0,2195		0,1230		0,0000		1,4111	
	$\alpha = 1$	0,0933		0,2981		0,0467		0,0124		0,1091		21,7270		1,4111	
P3	$\alpha = 2$	0,2022	0,2522	0,3141	0,5297	0,2407	0,3083	0,1043	0,1684	0,0418	0,2148	0,0265	9,8777	77,6686	29,5121
	$\alpha = 3$	0,4613		0,9769		0,6376		0,3886		0,4934		7,8796		9,4565	
	$\alpha = 1$	0,0420		0,0311		0,0142		0,1045		0,2641		0,0230		15,4947	
P4	$\alpha = 2$	0,2113	0,1044	0,1846	0,0721	0,3150	0,1543	0,3863	0,2181	0,5648	0,3458	12,0635	4,0333	2,2281	29,4836
	$\alpha = 3$	0,0598		0,0005		0,1337		0,1636		0,2085		0,0133		70,7281	

APENDICE B - RESULTADOS DOS PARÂMETROS PARA O CASO 1 COM FALHA SELANTE

CRMP							
	I1	I2	I3	I4	I5	τ_j	J_j
P1	0,0169	0,5130	0,0000	0,0000	0,0000	15,4966	1,4548
P4	0,6373	0,0082	0,4786	0,4984	0,3822	31,4571	1,3258
P3	0,0000	0,4644	0,0000	0,0000	0,0000	17,4473	1,3258
P4	0,3458	0,0143	0,5214	0,5016	0,6178	28,0152	1,3258
SOMA	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000		

CRM-ML													
	Camada	I1	I1 - Média	I2	I2 - Média	I3	I3 - Média	I4-1	I4 - Média	I5-1	I5 - Média	τ_j	J_j
	$\alpha = 1$	0,0026		0,4274		0,0000		0,0175		0,0251			
P1	$\alpha = 2$	0,0000	0,0155	0,5038	0,4917	0,0000	0,0000	0,0000	0,0141	0,0000	0,0084	14,6630	1,4686
	$\alpha = 3$	0,0439		0,5438		0,0000		0,0248		0,0000			
	$\alpha = 1$	0,6664		0,1041		0,5147		0,4530		0,3002			
P2	$\alpha = 2$	0,6755	0,6398	0,0000	0,0432	0,4492	0,4782	0,4956	0,3162	0,3828	0,3738	31,1693	1,3300
	$\alpha = 3$	0,5774		0,0256		0,4707		0,4640		0,4385			
	$\alpha = 1$	0,0290		0,4140		0,0000		0,0000		0,0291			
P3	$\alpha = 2$	0,0000	0,0097	0,4962	0,4231	0,0000	0,0000	0,0000	0,0209	0,0000	0,0097	14,4246	1,3300
	$\alpha = 3$	0,0000		0,3592		0,0000		0,0627		0,0000			
	$\alpha = 1$	0,3020		0,0545		0,4853		0,5294		0,6456			
P4	$\alpha = 2$	0,3245	0,3351	0,0000	0,0420	0,5508	0,5218	0,5044	0,4941	0,6172	0,6081	26,9679	1,3300
	$\alpha = 3$	0,3788		0,0714		0,5293		0,4485		0,5615			

CRM-MLMTC															
	Camada	I1	I1 - Média	I2	I2 - Média	I3	I3 - Média	I4-1	I4 - Média	I5-1	I5 - Média	τ_j	τ_j - Média	J_j	J_j - Média
	$\alpha = 1$	0,0000		0,4755		0,0000		0,0000		0,0017		22,4655		1,3300	
P1	$\alpha = 2$	0,0103	0,0034	0,4973	0,5196	0,0000	0,0000	0,0025	0,0008	0,0000	0,0060	8,7718	17,3928	2,0836	1,5842
	$\alpha = 3$	0,0000		0,5860		0,0000		0,0000		0,0162		20,9410		1,3389	
	$\alpha = 1$	0,7151		0,0562		0,5081		0,4521		0,3038		42,6059		1,3300	
P2	$\alpha = 2$	0,6629	0,6574	0,0000	0,0244	0,4838	0,4846	0,4815	0,4684	0,3783	0,3712	15,4669	34,2629	2,6279	1,7626
	$\alpha = 3$	0,5944		0,0170		0,4620		0,4717		0,4316		44,7160		1,3300	
	$\alpha = 1$	0,0104		0,4683		0,0000		0,0000		0,0095		22,2937		1,3300	
P3	$\alpha = 2$	0,0000	0,0035	0,5027	0,4560	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008	0,0000	0,0032	10,1187	17,9044	2,3982	1,6861
	$\alpha = 3$	0,0000		0,3970		0,0000		0,0024		0,0000		21,3008		1,3300	
	$\alpha = 1$	0,2745		0,0000		0,4919		0,5479		0,6850		39,6506		1,3300	
P4	$\alpha = 2$	0,3268	0,3357	0,0000	0,0000	0,5162	0,5154	0,5160	0,5299	0,6217	0,6196	14,9982	31,4008	2,4098	1,6899
	$\alpha = 3$	0,4056		0,0000		0,5380		0,5259		0,5523		39,5535		1,3300	

APÊNDICE C - RESULTADOS DOS PARÂMETROS PARA O CASO 1COM CANAIS DE ALTA PERMEABILIDADE E FALHA SELANTE

CRMP							
	I1	I2	I3	I4	I5	τ_j	J_j
P1	0,0811	0,2383	0,0000	0,0000	0,0374	14,5428	3,7835
P4	0,6366	0,2412	0,6649	0,6205	0,3379	0,0000	1,4761
P3	0,0225	0,5205	0,0000	0,0470	0,0522	3,9395	11,4961
P4	0,2597	0,0000	0,3351	0,3325	0,5725	20,2286	1,4761
SOMA	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000		

CRM-ML													
	Camada	I1	I1 - Média	I2	I2 - Média	I3	I3 - Média	I4-1	I4 - Média	I5-1	I5 - Média	τ_j	J_j
	α = 1	0,0000		0,1358		0,0000		0,0000		0,0000			
P1	α = 2	0,0000	0,0672	0,3917	0,1758	0,0000	0,0341	0,0000	0,0268	0,0214	0,0538	16,4414	3,7691
	α = 3	0,2016		0,0000		0,1022		0,0804		0,1399			
	α = 1	0,8629		0,3654		0,9821		0,8081		0,5572			
P2	α = 2	0,6025	0,6322	0,1770	0,2178	0,4897	0,6381	0,5018	0,4366	0,4032	0,4185	0,0000	3,7916
	α = 3	0,4311		0,1110		0,4427		0,4727		0,2950			
	α = 1	0,0000		0,2075		0,0000		0,0000		0,0612			
P3	α = 2	0,0000	0,0478	0,3387	0,4598	0,0498	0,0403	0,0000	0,0274	0,0149	0,0674	2,5085	14,5799
	α = 3	0,1434		0,8332		0,0711		0,0823		0,1261			
	α = 1	0,1371		0,2913		0,0179		0,1919		0,3816			
P4	α = 2	0,3975	0,2528	0,0926	0,1466	0,4605	0,2875	0,4982	0,3516	0,5604	0,4603	0,0508	22,8346
	α = 3	0,2239		0,0559		0,3840		0,3646		0,4390			

CRM-MLMTC															
	Camada	I1	I1 - Média	I2	I2 - Média	I3	I3 - Média	I4-1	I4 - Média	I5-1	I5 - Média	τ_j	τ_j - Média	J_j	J_j - Média
	$\alpha = 1$	0,0000		0,3074		0,0000		0,0000		0,0000		19,2539		1,4761	
P1	$\alpha = 2$	0,0000	0,0340	0,4806	0,2804	0,0000	0,0203	0,0000	0,0218	0,0000	0,0000	9,6902	18,7099	1,9556	2,1585
	$\alpha = 3$	0,1020		0,0532		0,0609		0,0653		0,0000		27,1856		3,0439	
	$\alpha = 1$	1,0000		0,2044		1,0000		0,8915		0,6464		7,7626		9,9990	
P2	$\alpha = 2$	0,7793	0,6990	0,0744	0,1168	0,6915	0,6599	0,5944	0,6061	0,4161	0,4233	18,1523	8,6383	2,2664	4,5805
	$\alpha = 3$	0,3176		0,0717		0,2881		0,3323		0,2074		0,0000		1,4761	
	$\alpha = 1$	0,0000		0,4882		0,0000		0,0000		0,0017		19,7550		1,4761	
P3	$\alpha = 2$	0,0000	0,0195	0,4328	0,5987	0,0000	0,0046	0,0000	0,0129	0,0000	0,0047	7,7394	9,8213	2,3486	6,6991
	$\alpha = 3$	0,0584		0,8751		0,0137		0,0387		0,0123		1,9697		16,2727	
	$\alpha = 1$	0,0000		0,0000		0,0000		0,1085		0,3518		16,7218		1,4761	
P4	$\alpha = 2$	0,2207	0,2476	0,0123	0,0041	0,3085	0,3153	0,4056	0,3592	0,5839	0,5720	14,8730	10,5316	3,0531	2,0018
	$\alpha = 3$	0,5220		0,0000		0,6373		0,5637		0,7803		44,6025		1,4761	

APÊNDICE D - RESULTADOS DOS PARÂMETROS PARA O CASO 1 COM CANAIS DE ALTA PERMEABILIDADE, CALCULADOS DE FORMA DINÂMICA

CRMP							
	I1	**I2**	**I3**	**I4**	**I5**	τ_j	J_j
P1	0,2016	0,4165	0,5526	0,1940	0,4047	8,1847	2,3540
P2	0,7607	0,0000	0,0000	0,0000	0,1821	100,0000	3,7380
P3	0,0000	0,2794	0,0000	0,3847	0,0000	9,1001	4,0264
P4	0,0377	0,3041	0,4474	0,4197	0,4133	9,0106	1,3030
SOMA	1,0000	1,0000	1,0000	0,9984	1,0000		

CRM-ML - 1° INTERVALO														
	Camada	I1		I1 - Média	I2	I2 - Média	I3	I3 - Média	I4-1	I4 - Média	I5-1	I5 - Média	τ_j	J_j
	$\alpha = 1$	$\alpha = 1$	0,3415		0,0000		0,0000		0,2952		0,5352			
P1	$\alpha = 2$	$\alpha = 2$	0,1918	0,3319	0,4866	0,2322	0,3327	0,2374	0,0000	0,1841	0,3235	0,3993	12,6970	6,8652
	$\alpha = 3$	$\alpha = 3$	0,4624		0,2099		0,3795		0,2570		0,3392			
	$\alpha = 1$	$\alpha = 1$	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000			
P2	$\alpha = 2$	$\alpha = 2$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$\alpha = 3$	$\alpha = 3$	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000			
	$\alpha = 1$	$\alpha = 1$	0,3750		1,0000		1,0000		0,2487		0,0000			
P3	$\alpha = 2$	$\alpha = 2$	0,0000	0,2384	0,1633	0,6511	0,0742	0,5649	1,0000	0,6347	0,2184	0,0728	23,2273	14,0628
	$\alpha = 3$	$\alpha = 3$	0,3403		0,7901		0,6205		0,6554		0,0000			
	$\alpha = 1$	$\alpha = 1$	0,2835		0,0000		0,0000		0,4561		0,4648			
P4	$\alpha = 2$	$\alpha = 2$	0,6280	0,3696	0,3501	0,1167	0,5931	0,1977	0,0000	0,1812	0,4582	0,5279	22,7783	1,0351
	$\alpha = 3$	$\alpha = 3$	0,1973		0,0000		0,0000		0,0876		0,6608			

CRM-ML - 2° INTERVALO													
	Camada	I1	I1 - Média	I2	I2 - Média	I3	I3 - Média	I4-1	I4 - Média	I5-1	I5 - Média	τ_j	J_j
	α = 1	0,602371		0,658463		0,492042		0,406284		0,263384			
P1	α = 2	0,596725	0,6579	0,559791	0,6238	0,59669	0,5164	0,400476	0,4272	0,375596	0,3930	64,9678	2,5327
	α = 3	0,774638		0,65321		0,460598		0,474986		0,540082			
	α = 1	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000			
P2	α = 2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	α = 3	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000			
	α = 1	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000			
P3	α = 2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	α = 3	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000			
	α = 1	0,397629		0,341537		0,507958		0,593716		0,736616			
P4	α = 2	0,403275	0,3421	0,440209	0,3762	0,40331	0,4836	0,599524	0,5728	0,624404	0,6070	74,6100	1,3983
	α = 3	0,225362		0,34679		0,539402		0,525014		0,459918			

CRM-ML - 3° INTERVALO													
	Camada	I1	I1 - Média	I2	I2 - Média	I3	I3 - Média	I4-1	I4 - Média	I5-1	I5 - Média	τ_j	J_j
	α = 1	0,204167		0,30444		0,0000		0,009192		0,187989			
P1	α = 2	0,536969	0,4378	0,383115	0,4010	0,311289	0,2234	0,117712	0,1075	0,312727	0,2879	21,73119	0,673628
	α = 3	0,572272		0,51545		0,358841		0,195731		0,362875			
	α = 1	0,740162		0,55239		1,0000		0,845958		0,463119			
P2	α = 2	0,149522	0,3291	0,409398	0,3631	0,442666	0,6124	0,58456	0,6571	0,247578	0,3305	2,583109	5,929085
	α = 3	0,097586		0,127463		0,394679		0,540857		0,280815			
	α = 1	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000			
P3	α = 2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	α = 3	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000			
	α = 1	0,05567		0,14317		0,0000		0,14485		0,348892			
P4	α = 2	0,31351	0,2331	0,207488	0,2359	0,246045	0,1642	0,297728	0,2353	0,439695	0,3816	20,8737	0,0000
	α = 3	0,330142		0,357087		0,246481		0,263413		0,35631			

CRM-MLMTC - 1° INTERVALO															
	Camada	I1	I1 - Média	I2	I2 - Média	I3	I3 - Média	I4-1	I4 - Média	I5-1	I5 - Média	τ_j	τ_j - Média	J_j	J_j - Média
	α = 1	0,4469		0,0000		0,0000		0,3235		0,5602		29,8906		5,0584	
P1	α = 2	0,3793	0,3317	0,4595	0,1532	0,3694	0,2771	0,0000	0,1866	0,3648	0,4330	8,3026	29,0520	5,4586	7,0038
	α = 3	0,1687		0,0000		0,4620		0,2364		0,3739		48,9629		10,4943	
	α = 1	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
P2	α = 2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	α = 3	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
	α = 1	0,4705		1,0000		1,0000		0,0170		0,0000		100,0000		0,0000	
P3	α = 2	0,0000	0,3513	0,2031	0,7344	0,0000	0,5127	1,0000	0,5465	0,0694	0,0231	82,3126	63,8597	5,5932	7,3745
	α = 3	0,5833		1,0000		0,5380		0,6225		0,0000		9,2664		16,5302	
	α = 1	0,0826		0,0000		0,0000		0,5527		0,4398		26,1294		1,1570	
P4	α = 2	0,5594	0,2966	0,3374	0,1125	0,6306	0,2102	0,0000	0,2313	0,5658	0,5439	18,8789	22,6203	1,9277	1,3993
	α = 3	0,2479		0,0000		0,0000		0,1411		0,6261		22,8527		1,1132	

CRM-MLMTC - 2° INTERVALO															
	Camada	I1	I1 - Média	I2	I2 - Média	I3	I3 - Média	I4-1	I4 - Média	I5-1	I5 - Média	τ_j	τ_j - Média	J_j	J_j - Média
	α = 1	0,5875		0,6434		0,4150		0,3778		0,1798		69,7696		1,3651	
P1	α = 2	0,6374	0,6776	0,6261	0,6412	0,5396	0,4571	0,4057	0,4509	0,4182	0,3897	28,8522	58,9697	1,7004	1,6569
	α = 3	0,8080		0,6543		0,4166		0,5691		0,5711		78,2873		1,9053	
	α = 1	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
P2	α = 2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	α = 3	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
	α = 1	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
P3	α = 2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	α = 3	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
	α = 1	0,4125		0,3566		0,5850		0,6222		0,8202		89,3274		1,2798	
P4	α = 2	0,3626	0,3224	0,3739	0,3588	0,4604	0,5429	0,5943	0,5491	0,5818	0,6103	24,9410	67,2077	3,5780	1,6193
	α = 3	0,1920		0,3457		0,5834		0,4309		0,4289		87,3547		0,0000	

CRM-MLMTC - 3° INTERVALO															
	Camada	I1	I1 - Média	I2	I2 - Média	I3	I3 - Média	I4-1	I4 - Média	I5-1	I5 - Média	τ_j	τ_j - Média	J_j	J_j - Média
	$\alpha = 1$	0,1601		0,2515		0,0000		0,0538		0,1139		17,5140		0,6305	
P1	$\alpha = 2$	0,5489	0,4373	0,5048	0,4464	0,4245	0,2561	0,0908	0,0639	0,4227	0,2541	13,1013	22,2330	3,9306	2,1707
	$\alpha = 3$	0,6028		0,5828		0,3438		0,0473		0,2257		36,0838		1,9509	
	$\alpha = 1$	0,8109		0,6702		1,0000		0,7746		0,6050		2,2600		16,6436	
P2	$\alpha = 2$	0,1122	0,3077	0,1742	0,2815	0,2010	0,5327	0,6126	0,7677	0,0317	0,4039	44,2627	36,2203	0,7786	6,5068
	$\alpha = 3$	0,0000		0,0000		0,3972		0,9158		0,5751		62,1382		2,0983	
	$\alpha = 1$	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
P3	$\alpha = 2$	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	$\alpha = 3$	0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000		0,0000	
	$\alpha = 1$	0,0290		0,0783		0,0000		0,1716		0,2811		16,0565		1,0446	
P4	$\alpha = 2$	0,3389	0,2551	0,3210	0,2722	0,3745	0,2112	0,2966	0,1684	0,5457	0,3420	11,8054	26,8037	2,3639	1,4759
	$\alpha = 3$	0,3972		0,4172		0,2590		0,0369		0,1992		52,5492		1,0190	

APÊNDICE E - RESULTADOS DOS PARÂMETROS CASO BCO COM 6 INTERVALOS.

CRMP-D – 1° INTERVALO (1/6)								
	I1	**I2**	**I3**	**I4**	**I5**	**I6**	τ_j	J_j
P1	0,3834	0,0148	0,0000	0,1622	0,3150	0,0000	34,1496	81,6070
P2	0,0000	0,4580	0,1984	0,0000	0,0000	0,0000	39,3155	53,1371
P3	0,3119	0,2365	0,1073	0,2275	0,3130	0,0000	32,2106	75,6573
P4	0,0877	0,0681	0,0985	0,1135	0,0354	0,0000	33,4002	32,2250
P5	0,0655	0,0489	0,1131	0,1078	0,0503	0,0000	32,9401	36,1428
P6	0,1175	0,1134	0,2551	0,1176	0,0398	0,0000	33,1531	52,2114
P7	0,0340	0,0602	0,2277	0,2676	0,2465	0,0000	33,3511	70,9996
SOMA	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**0,9962**	**1,0000**	**0,0000**		

CRMP-D – 2° INTERVALO (2/6)								
	I1	**I2**	**I3**	**I4**	**I5**	**I6**	τ_j	J_j
P1	0,2314	0,2197	0,1778	0,1291	0,1720	0,2079	18,5649	62,4035
P2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P3	0,0872	0,4155	0,5942	0,1395	0,2109	0,4823	24,9769	112,7930
P4	0,0681	0,0638	0,1139	0,1221	0,1233	0,0782	45,0230	32,5023
P5	0,0833	0,1230	0,0486	0,1033	0,1379	0,0556	41,6949	31,8878
P6	0,2684	0,0895	0,0000	0,2280	0,0291	0,1336	100,0000	36,4426
P7	0,2615	0,0885	0,0607	0,2781	0,3268	0,0424	41,5895	53,1548
SOMA	**1,0000**	**1,0000**	**0,9951**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**		

CRMP-D – 3° INTERVALO (3/6)								
	I1	**I2**	**I3**	**I4**	**I5**	**I6**	τ_j	J_j
P1	0,3475	0,2719	0,1445	0,1619	0,0128	0,2411	31,7909	61,8356
P2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P3	0,2930	0,4617	0,3279	0,2967	0,1441	0,4572	17,7115	89,5851
P4	0,0207	0,0580	0,1269	0,1102	0,1966	0,0447	99,2489	34,7032
P5	0,0625	0,0439	0,1004	0,0844	0,1885	0,0491	99,7802	25,4841
P6	0,1712	0,1071	0,1477	0,1159	0,1195	0,0739	39,8290	42,4561
P7	0,1051	0,0574	0,1526	0,2273	0,3386	0,1341	37,8999	55,8509
SOMA	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**0,9965**	**1,0000**	**1,0000**		

CRMP-D – 4° INTERVALO (4/6)								
	I1	**I2**	**I3**	**I4**	**I5**	**I6**	τ_j	J_j
P1	0,2482	0,2436	0,1738	0,1514	0,1369	0,2513	28,9488	59,6542
P2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P3	0,4024	0,4211	0,4309	0,2206	0,1974	0,3442	17,6937	81,6829
P4	0,0437	0,1222	0,0071	0,1468	0,0615	0,1365	47,5606	24,8274
P5	0,0593	0,0842	0,0799	0,0890	0,1034	0,0948	28,6533	32,7733
P6	0,1176	0,0706	0,1728	0,1333	0,1321	0,1106	36,0100	38,6371
P7	0,1288	0,0583	0,1354	0,2581	0,3686	0,0625	35,4213	57,4240
SOMA	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**0,9992**	**1,0000**	**1,0000**		

CRMP-D – 5° INTERVALO (5/6)								
	I1	**I2**	**I3**	**I4**	**I5**	**I6**	τ_j	J_j
P1	0,3155	0,2363	0,1341	0,1641	0,2017	0,1587	23,7288	62,4544
P2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P3	0,3166	0,4291	0,3238	0,2696	0,2336	0,4770	22,4081	105,9500
P4	0,1035	0,0721	0,0689	0,1130	0,0477	0,0902	34,7120	30,7627
P5	0,0491	0,0566	0,1329	0,0796	0,0758	0,0962	33,7309	30,3016
P6	0,1058	0,1027	0,1545	0,1431	0,1651	0,0708	30,0040	40,0370
P7	0,1094	0,1032	0,1858	0,2306	0,2760	0,1071	34,8197	47,7098
SOMA	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**		

CRMP-D – 6° INTERVALO (6/6)								
	I1	**I2**	**I3**	**I4**	**I5**	**I6**	τ_j	J_j
P1	0,3077	0,2172	0,1874	0,1876	0,1364	0,1764	22,4326	55,0875
P2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P3	0,3059	0,4228	0,3615	0,2257	0,2886	0,4672	16,7604	79,2421
P4	0,0885	0,0964	0,0524	0,1174	0,0601	0,0731	31,8915	25,7749
P5	0,0641	0,0793	0,0784	0,0859	0,0816	0,0863	28,7571	26,1110
P6	0,1139	0,1035	0,1674	0,1285	0,1215	0,1097	28,4845	33,3320
P7	0,1198	0,0808	0,1529	0,2549	0,3118	0,0873	30,7001	57,3306
SOMA	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**		

APÊNDICE F - RESULTADOS DOS PARÂMETROS CASO BCO COM 4 INTERVALOS.

CRMP-D – 1° INTERVALO (1/4)								
	I1	**I2**	**I3**	**I4**	**I5**	**I6**	τ_j	J_j
P1	0,3834	0,0148	0,0000	0,1622	0,3150	0,0000	34,1496	81,6069
P2	0,0000	0,4580	0,1984	0,0000	0,0000	0,0000	39,3155	53,1369
P3	0,3119	0,2365	0,1073	0,2275	0,3130	0,0000	32,2106	75,6573
P4	0,0877	0,0681	0,0985	0,1135	0,0354	0,0000	33,4002	32,2251
P5	0,0655	0,0489	0,1131	0,1078	0,0503	0,0000	32,9401	36,1428
P6	0,1175	0,1134	0,2551	0,1176	0,0398	0,0000	33,1531	52,2111
P7	0,0340	0,0602	0,2277	0,2676	0,2465	0,0000	33,3511	70,9997
SOMA	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**0,9962**	**1,0000**	**0,0000**		

CRMP-D – 2° INTERVALO (2/4)								
	I1	**I2**	**I3**	**I4**	**I5**	**I6**	τ_j	J_j
P1	0,3025	0,1783	0,2283	0,1329	0,0818	0,2349	30,3493	66,9130
P2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P3	0,2171	0,3933	0,5627	0,1935	0,1103	0,4805	28,4366	101,4430
P4	0,0919	0,0766	0,0852	0,1159	0,1159	0,0816	40,5613	31,4371
P5	0,0696	0,1164	0,0258	0,1022	0,1565	0,0718	49,5103	27,8934
P6	0,1930	0,1487	0,0798	0,1293	0,1398	0,0486	100,0000	34,9571
P7	0,1259	0,0866	0,0139	0,3262	0,3958	0,0827	100,0000	59,2713
SOMA	**1,0000**	**1,0000**	**0,9957**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**		

CRMP-D – 3° INTERVALO (3/4)								
	I1	**I2**	**I3**	**I4**	**I5**	**I6**	τ_j	J_j
P1	0,2725	0,2443	0,1805	0,1190	0,1487	0,2386	27,6666	53,7045
P2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P3	0,3507	0,4216	0,4356	0,1893	0,1757	0,4483	19,3591	86,4157
P4	0,0777	0,0989	0,0000	0,2165	0,1224	0,0000	100,0000	29,4134
P5	0,0777	0,0791	0,0487	0,1197	0,1170	0,0660	34,0193	27,0806
P6	0,1074	0,0908	0,1680	0,1044	0,1309	0,1360	34,2200	42,0534
P7	0,1127	0,0652	0,1673	0,2511	0,3051	0,1112	34,2944	52,9817
SOMA	**0,9987**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**		

CRMP-D – 4° INTERVALO (4/4)								
	I1	**I2**	**I3**	**I4**	**I5**	**I6**	τ_j	J_j
P1	0,3148	0,2091	0,1855	0,1748	0,1489	0,1799	22,3691	61,9435
P2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P3	0,2828	0,4666	0,3560	0,2241	0,2539	0,4827	17,4815	100,2977
P4	0,0976	0,0748	0,0601	0,1173	0,0694	0,0710	34,0165	26,0686
P5	0,0745	0,0505	0,0910	0,0922	0,0933	0,0776	32,3034	25,7967
P6	0,1189	0,1033	0,1552	0,1457	0,1241	0,0965	28,3860	33,0474
P7	0,1115	0,0958	0,1523	0,2460	0,3104	0,0924	35,8941	56,5065
SOMA	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**	**1,0000**		