



MÉTODO BASEADO EM ENSEMBLE COM REFINAMENTO NA MATRIZ DE SENSIBILIDADE PARA OTIMIZAÇÃO DE INJEÇÃO ÁGUA COM POÇOS INTELIGENTES

Juan Alberto Rojas Tueros

Bernardo Horowitz

albert_rojast@hotmail.com

horowitz@ufpe.br

Ramiro Brito Willmersdorf

ramiro@willmersdorf.net

Universidade Federal de Pernambuco

Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, 50740-530, Pernambuco, Recife, Brasil

Resumo. Neste trabalho, apresentamos uma implementação do método baseado em ensemble para um problema de otimização de injeção de água. O valor presente líquido (VPL) é maximizado sujeito a restrições de válvulas nos poços, a nível de poço e de reservatório. O refinamento da matriz de sensibilidade para o cálculo do vetor gradiente é discutido. A função objetivo é maximizada utilizando o algoritmo de programação quadrática sequencial, as variáveis de controles são as vazões de injeção e produção nas válvulas de controle nos poços. Uma aproximação do vetor gradiente é a soma das colunas da matriz de sensibilidade. O refinamento da matriz de sensibilidade é obtido através do estudo da dependência do VPL do poço com as variáveis de controle das válvulas. As simulações são executadas em paralelo utilizando o simulador comercial IMEX. O ensemble das realizações são as perturbações de prévios controles do processo de otimização. A metodologia proposta foi aplicada a um modelo de reservatório com 12 poços, três válvulas de controle por poço e seis ciclos de controle. Analisamos a sensibilidade do VPL de um poço com os diferentes controles das válvulas dos outros poços. Neste trabalho foi utilizado um ensemble de 1.4% do número de variáveis de controle. O melhor resultado obtido com os refinamentos da matriz de sensibilidade foi 16.3% maior que o obtido com a matriz de sensibilidade sem refinamento.

Palavras chaves: Otimização de injeção de água. Métodos baseado em ensemble, Sensibilidade e Otimização restrita.

1 INTRODUÇÃO

Novas aplicações são importantes para incrementar a rentabilidade da produção de óleo. Um dos mecanismos de recuperação secundária utilizado em todo o mundo, depois da depleção natural é a injeção de água. Basicamente a injeção de água é o bombeamento de água através de um poço injetor dentro do reservatório. A água injetada ajuda a manter a pressão e melhorar a varredura de óleo no reservatório. Os problemas comuns na injeção de água são a irrupção de água no poço produtor, pobre eficiência do varrido e avanço no sentido preferencial do escoamento, originando possíveis ativações de falhas. Diferentes métodos são analisados para resolver estes problemas. Neste trabalho são utilizadas válvulas de controle de vazão nos poços, amplamente estudado por (Brouwer et al., 2001), (Glandt, 2005), (Emerick e Portella, 2007), (Gao et al., 2007), (Su, 2009, Meshioye et al., 2010), (Valestrand et al., 2014). Quando as válvulas de controle são utilizadas nos poços, são chamados de poços inteligentes. Esta tecnologia ajuda a isolar o reservatório em diferentes segmentos. Cada segmento pode ser tratado separadamente e tratado como um único poço independente.

Neste trabalho, nosso objetivo é a otimização de produção sujeita a restrições de vazão nas válvulas de controle dos poços, nível de poço e campo. As restrições são impostas para garantir a viabilidade física da solução, que não viole as práticas da engenharia. A ajuda da otimização de produção é encontrar a ótima operação das vazões nas válvulas dos poços que maximize a rentabilidade do reservatório. A rentabilidade é medida pelo VPL, que avalia o fluxo de caixa da produção do campo levando em conta uma taxa de desconto.

Para a otimização de produção em reservatórios de óleo, as técnicas mais eficientes envolve o cálculo do gradiente com respeito a suas variáveis de controle (Chen e Oliver, 2012). O cálculo do vetor gradiente da função objetivo é eficientemente calculada usando o método adjunto (Brouwer e Jansen, 2004), e é requerido unicamente duas simulações para este cálculo independentemente do número de variáveis, porém, a implementação do método é complicada e requer acesso ao código do simulador, que não é possível quando usamos um simulador comercial. Uma alternativa para o cálculo do vetor gradiente sem o método adjunto é a técnica estocástica, baseada em ensemble. Fácil de programar e independente do simulador de reservatórios para aproximar o vetor gradiente, portanto, a técnica é uma aproximação não local gerada sobre o espaço das realizações das variáveis de controle, onde as realizações são geradas por amostragem (Chen e Oliver, 2012).

A aproximação do vetor gradiente por ensemble pode ser obtido a partir da soma das colunas da matriz de sensibilidade do VPL dos poços com suas variáveis de controle. A matriz de sensibilidade é calculada do produto da pseudo inversa da matriz de covariância e da covariância cruzada (Tueros et. al., 2016). A matriz de covariância é calculada a partir dos membros do ensemble das realizações. A qualidade da matriz de sensibilidade diminui com o tamanho do ensemble, embora, usar ensemble de menor tamanho introduz correlações espúrias no cálculo da matriz de sensibilidade, causado pelos erros de amostragem ou quando o número de variáveis é grande, onde a correlação de alguma delas com o VPL do campo é pequena. Na sensibilidade, a correlação do VPL do poço com as variáveis de controle do mesmo poço são fortes e pode ser obtida por pequenos ensembles, e, a correlação do VPL do poço com as outras variáveis é geralmente pequena, dificultando assim seu cálculo. Neste trabalho é proposto refinamentos na matriz de sensibilidade para reduzir os efeitos de correlações espúrias quando os poços apresentam múltiplas válvulas.

O vetor gradiente aproximado com refinamento é utilizado no algoritmo de programação quadrática sequencial para otimizar a produção de um reservatório com sete produtores, cinco injetores e cada poço com três válvulas de controle.

2 METODOLOGIA

2.1 Formulação do problema de injeção de água

Matematicamente o problema pode ser formulado como segue:

$$\begin{aligned}
 \text{Maximize } VPL = f(q) &= \left[\sum_{j=1}^{N_v} \frac{1}{(1+d)^{\tau_j}} F(q_j) \right] \\
 \text{Sujeito a: } \sum_{i=1}^{N_v} (q_{Q_w}^i)_j &\leq Q_{w,j} \quad ; \quad w=1, \dots, N_w \\
 &\quad j=1, \dots, N_c \\
 \sum_{w \in \text{prod}} Q_{w,j} &\leq Q_{liq,m\acute{a}x} \quad ; \quad j=1, \dots, N_c \\
 \sum_{w \in \text{inj}} Q_{w,j} &\leq Q_{inj,m\acute{a}x} \quad ; \quad j=1, \dots, N_c \\
 &\quad w=1, \dots, N_w \\
 (q_{Q_w}^i)_j^\ell &\leq (q_{Q_w}^i)_j \leq (q_{Q_w}^i)_j^u \quad ; \quad i=1, \dots, N_v \\
 &\quad j=1, \dots, N_c
 \end{aligned} \tag{1}$$

Na Eq. (1) $q = \left[(q_{Q_1}^1)_1, \dots, (q_{Q_1}^{N_v})_1, \dots, (q_{Q_w}^{N_v})_{N_c}, \dots, (q_{Q_w}^{N_v})_{N_c} \right]^T$ é o vetor das vazões das válvulas de controle dos poços para todos os ciclos de controle, $q_j = \left[(q_{Q_1}^1)_j, \dots, (q_{Q_1}^{N_v})_j, \dots, (q_{Q_w}^{N_v})_j, \dots, (q_{Q_w}^{N_v})_j \right]^T$ é o controle das vazões das válvulas nos poços no ciclo de controle j ; $(q_{Q_w}^i)_j$ é a vazão líquida da válvula de controle i , no poço Q_w , do ciclo de controle j . N_v é o número de válvulas de controle, N_c é o número de ciclos de controle. Na função objetivo, o parâmetro d é a taxa de desconto, τ_j é o tempo no ciclo de controle j , $Q_{w,j}$ é a vazão máxima permitida do poço w no ciclo de controle j , $Q_{liq,m\acute{a}x}$ é a produção total máxima permitida e $Q_{inj,m\acute{a}x}$ é a injeção total máxima permitida no reservatório. Os índices ℓ e u representam os limites inferiores e superiores das variáveis de controle, respectivamente.

O fluxo de caixa no ciclo de controle j , representa a receita de óleo menos o custo da injeção de água e a produção de água que é dado por:

$$F(q_j) = \Delta \tau_j \left[\sum_{w \in \text{prod}} (r_o Q_{w,j}^o - c_w Q_{w,j}^w) - \sum_{w \in \text{inj}} (c_{wi} Q_{w,j}) \right] \tag{2}$$

Onde $\Delta\tau_j$ é o tamanho de tempo do ciclo de controle j ; $prod$ e inj são os conjuntos dos poços produtores e injetores, respectivamente; $Q_{w,j}^o$ e $Q_{w,j}^w$ são as vazões de óleo e água do poço produtor w , no ciclo de controle j ; r_o é o preço de óleo; c_w e c_{wi} são custos da produção e injeção de água respectivamente. Os índices o e W denotam respectivamente as fases óleo e água.

Este problema é subdividido em períodos de concessão dentro do número de ciclos de controle, N_c , que é o tempo fixado. Como as variáveis de controle são as vazões de cada válvula dos poços em cada ciclo de controle, as vazões podem ser normalizadas:

$$\left(x_{P_w}^i\right)_j = \frac{\left(q_{Q_{w,j}^o}^i\right)_j}{Q_{w,j}}, Q_{w,j} \in prod; \quad \left(x_{I_w}^i\right)_j = \frac{\left(q_{Q_{w,j}^w}^i\right)_j}{Q_{w,j}}, Q_{w,j} \in inj. \quad (3)$$

As variáveis de projeto $\left(x_{P_w}^i\right)_j$ e $\left(x_{I_w}^i\right)_j$ são as frações alocadas para cada válvula do poço Q_w no tempo j . Para este trabalho é considerada a seguinte formulação:

$$\begin{aligned} \text{Maximize } VPL = f(\mathbf{X}) &= \left[\sum_{j=1}^{N_c} \frac{1}{(1+d)^{\tau_j}} F(\mathbf{X}_j) \right] \\ \text{Sujeito a: } \sum_{i=1}^{N_v} \left(x_{P_w}^i\right)_j &\leq 1 && ; P_w = P_1, \dots, P_{n_w} \\ &&& ; j = 1, \dots, N_c \\ \sum_{w \in prod} \left(\sum_{i=1}^{N_v} \left(x_{P_w}^i\right)_j \right) &\leq \frac{Q_{liq,m\acute{a}x}}{Q_{w,j}} && ; j = 1, \dots, N_c \\ \sum_{w \in inj} \left(\sum_{i=1}^{N_v} \left(x_{I_w}^i\right)_j \right) &\leq \frac{Q_{inj,m\acute{a}x}}{Q_{w,j}} && ; j = 1, \dots, N_c \\ 0 \leq \left(x_{P_w}^i\right)_j &\leq \frac{\left(q_{Q_w}^i\right)_{m\acute{a}x}}{Q_w} && w = 1, \dots, N_w \\ &&& ; i = 1, \dots, N_v \\ 0 \leq \left(x_{I_w}^i\right)_j &\leq \frac{\left(q_{Q_w}^i\right)_{m\acute{a}x}}{Q_w} && j = 1, \dots, N_c \end{aligned} \quad (4)$$

Onde X é o vetor das frações de vazão para todas as variáveis de controle dos poços; para todos os ciclos de controle e o vetor das frações de vazão para todas as válvulas dos poços produtores no ciclo de controle j :

$$X_j = \left[\left(x_{P_1}^1\right)_j, \dots, \left(x_{P_1}^{N_v}\right)_j, \dots, \left(x_{P_w}^{N_v}\right)_j, \dots, \left(x_{P_w}^{N_v}\right)_j, \left(x_{I_1}^1\right)_j, \dots, \left(x_{I_1}^{N_v}\right)_j, \dots, \left(x_{I_w}^{N_v}\right)_j, \dots, \left(x_{I_w}^{N_v}\right)_j \right]^T. \quad (5)$$

O cálculo da função objetivo (VPL) no problema de injeção de água necessita executar completamente o simulador de reservatórios e é um dos maiores consumidores de tempo no cálculo do vetor gradiente. Na sequencia apresentaremos uma alternativa para o cálculo do vetor gradiente da função objetivo.

2.2 Gradiente para o problema de injeção de água

Os métodos de otimização que utilizam gradientes são os mais eficientes em termos do valor da função objetivo e do número de iterações requeridas. Os simuladores comerciais em geral não dispõem do cálculo do gradiente. O cálculo numérico das derivadas resulta um alto custo computacional devido ao alto número de simulações requeridas. Uma estratégia para aproveitar os métodos de otimização mais eficientes é aproximar o cálculo do vetor gradiente. As vantagens são a redução do número de simulações e do uso do simulador de reservatórios como uma caixa preta sem a necessidade da intervenção do código fonte. O cálculo do vetor gradiente por ensemble é uma aproximação não local sobre o espaço gerado pelas variáveis de controle (Chen e Olivier, 2012). Para obter uma aproximação do vetor gradiente, será necessário:

1. Ponto inicial: Informar um ponto inicial para as válvulas de controle dos produtores e injetores (Eq.5). Este ponto é unicamente informado na primeira iteração e para as seguintes iterações é utilizado o ponto ótimo das iterações no processo de otimização.
2. Gerar diferentes realizações para os controles: Usar uma função de correlação (Gaussiana) para criar a matriz de covariância regularizada para os controles e evitar assim possíveis mudanças abruptas que possam ocorrer no tempo, usar a decomposição de Cholesky na matriz de covariância regularizada, informar um desvio padrão para produzir perturbações sobre os controles, criar um vetor de variáveis aleatórias independentes com média 0 e variância 1. Geradas as realizações, necessitam ser filtradas para atender as restrições impostas (capacidade, poços e válvulas dos poços, respectivamente). O conjunto de todas as realizações (N_e) forma um ensemble de realizações M :

$$M = \begin{bmatrix} (x_{P_1}^1)_1^1 & \cdots & (x_{P_1}^1)_{N_e}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (x_{I_{ni}}^{N_v})_j^1 & \cdots & (x_{I_{ni}}^{N_v})_{N_e}^j \end{bmatrix}; \bar{M} = \begin{bmatrix} \overline{(x_{P_1}^1)_1^1} & \cdots & \overline{(x_{P_1}^1)_{N_e}^1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \overline{(x_{I_{ni}}^{N_v})_j^1} & \cdots & \overline{(x_{I_{ni}}^{N_v})_{N_e}^j} \end{bmatrix} \text{ e } \Delta M = M - \bar{M}. \quad (6)$$

3. Calcular o VPL de cada poço: No processo de otimização da produção de um campo é necessário otimizar muitas variáveis de controle, a correlação de algumas delas com o VPL do campo é pequeno, dificultando seu cálculo quando o tamanho do ensemble é pequeno e por tanto sujeito a correlações espúrias. A correlação do VPL de cada poço devido a suas próprias variáveis são fortes e podem ser obtidos por pequenos ensembles. Por estas razões é necessário decompor o VPL do campo no VPL de cada poço para reduzir o efeito das correlações espúrias. Para calcular o VPL de cada poço é necessário executar

cada membro do ensemble no simulador de reservatórios. O VPL de cada poço pode ser expresso na seguinte matriz VPL_w :

$$VPL_w = \begin{bmatrix} (VPL_1)_j^1 & \cdots & (VPL_1)_j^{N_e} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (VPL_{N_w})_j^1 & \cdots & (VPL_{N_w})_j^{N_e} \end{bmatrix}; \Delta VPL = VPL_w - \overline{VPL_w} \text{ e } j = 1 \cdots N_c. \quad (7)$$

Fazendo a soma das linhas da matriz VPL_w podemos obter o VPL do campo. $\overline{VPL_w}$ é a média do VPL dos poços e ΔVPL é a matriz de desvios do VPL de cada poço.

4. Criar a matriz de covariância entre os membros do ensemble:

$$C_{xx} = AA^T; \quad A = \sqrt{\frac{1}{N_e - 1}} \Delta M. \quad (8)$$

A matriz é gerada pelos membros do ensemble que estão sujeitos a correlações espúrias quando o tamanho do ensemble é pequeno. Embora, a matriz de covariância tenha muitas correlações espúrias, muitas das perturbações das variáveis de controle são praticamente independente e a única exceção são os controles dos mesmos poços (Chen e Oliver, 2012).

5. Cálculo da matriz Pseudo inversa da matriz C_{xx} (Tueros et. al., 2015).
6. Estimar a matriz de covariância cruzada:

$$C_{xVPL_w} = C_{xx} G_{xVPL_w}. \quad (9)$$

A covariância cruzada entre o VPL e as variáveis de controle é provavelmente dominada por correlações espúrias quando o tamanho do ensemble é pequeno e quando o número de variáveis é grande

7. Cálculo da matriz de sensibilidade (Sem refinamento): Isto é obtido pelo produto da matriz pseudo inversa e a matriz covariância cruzada. Devido a utilização de poucos membros do ensemble a matriz de covariância apresenta correlações espúrias, então, a matriz de sensibilidade também apresenta correlações espúrias sendo negligenciados por possíveis refinamento.

$$G_{xVPL_w} = C_{xx}^{-1} C_{xVPL_w}. \quad (10)$$

Neste trabalho o número de válvulas por poços são três. Os elementos da matriz de sensibilidade podem ser expressos:

$$G_{XVPL_w}^j = \begin{bmatrix} \frac{\partial(VPL_{P_1})_j}{\partial x_{P_1}^1} & \frac{\partial(VPL_{P_2})_j}{\partial x_{P_1}^1} & \dots & \frac{\partial(VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{P_1}^1} & \frac{\partial(VPL_{I_1})_j}{\partial x_{P_1}^1} & \dots & \frac{\partial(VPL_{I_{ni}})_j}{\partial x_{P_1}^1} \\ \frac{\partial(VPL_{P_1})_j}{\partial x_{P_1}^2} & \frac{\partial(VPL_{P_2})_j}{\partial x_{P_1}^2} & \dots & \frac{\partial(VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{P_1}^2} & \frac{\partial(VPL_{I_1})_j}{\partial x_{P_1}^2} & \dots & \frac{\partial(VPL_{I_{ni}})_j}{\partial x_{P_1}^2} \\ \frac{\partial(VPL_{P_1})_j}{\partial x_{P_1}^3} & \frac{\partial(VPL_{P_2})_j}{\partial x_{P_1}^3} & \dots & \frac{\partial(VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{P_1}^3} & \frac{\partial(VPL_{I_1})_j}{\partial x_{P_1}^3} & \dots & \frac{\partial(VPL_{I_{ni}})_j}{\partial x_{P_1}^3} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial(VPL_{P_1})_j}{\partial x_{P_{np}}^1} & \frac{\partial(VPL_{P_2})_j}{\partial x_{P_{np}}^1} & \dots & \frac{\partial(VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{P_{np}}^1} & \frac{\partial(VPL_{I_1})_j}{\partial x_{P_{np}}^1} & \dots & \frac{\partial(VPL_{I_{ni}})_j}{\partial x_{P_{np}}^1} \\ \frac{\partial(VPL_{P_1})_j}{\partial x_{P_{np}}^2} & \frac{\partial(VPL_{P_2})_j}{\partial x_{P_{np}}^2} & \dots & \frac{\partial(VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{P_{np}}^2} & \frac{\partial(VPL_{I_1})_j}{\partial x_{P_{np}}^2} & \dots & \frac{\partial(VPL_{I_{ni}})_j}{\partial x_{P_{np}}^2} \\ \frac{\partial(VPL_{P_1})_j}{\partial x_{P_{np}}^3} & \frac{\partial(VPL_{P_2})_j}{\partial x_{P_{np}}^3} & \dots & \frac{\partial(VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{P_{np}}^3} & \frac{\partial(VPL_{I_1})_j}{\partial x_{P_{np}}^3} & \dots & \frac{\partial(VPL_{I_{ni}})_j}{\partial x_{P_{np}}^3} \\ \frac{\partial(VPL_{P_1})_j}{\partial x_{I_1}^1} & \frac{\partial(VPL_{P_2})_j}{\partial x_{I_1}^1} & \dots & \frac{\partial(VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{I_1}^1} & \frac{\partial(VPL_{I_1})_j}{\partial x_{I_1}^1} & \dots & \frac{\partial(VPL_{I_{ni}})_j}{\partial x_{I_1}^1} \\ \frac{\partial(VPL_{P_1})_j}{\partial x_{I_1}^2} & \frac{\partial(VPL_{P_2})_j}{\partial x_{I_1}^2} & \dots & \frac{\partial(VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{I_1}^2} & \frac{\partial(VPL_{I_1})_j}{\partial x_{I_1}^2} & \dots & \frac{\partial(VPL_{I_{ni}})_j}{\partial x_{I_1}^2} \\ \frac{\partial(VPL_{P_1})_j}{\partial x_{I_1}^3} & \frac{\partial(VPL_{P_2})_j}{\partial x_{I_1}^3} & \dots & \frac{\partial(VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{I_{ni}}^1} & \frac{\partial(VPL_{I_1})_j}{\partial x_{I_1}^3} & \dots & \frac{\partial(VPL_{I_{ni}})_j}{\partial x_{I_1}^3} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial(VPL_{P_1})_j}{\partial x_{I_{ni}}^1} & \frac{\partial(VPL_{P_2})_j}{\partial x_{I_{ni}}^1} & \dots & \frac{\partial(VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{I_{ni}}^1} & \frac{\partial(VPL_{I_1})_j}{\partial x_{I_{ni}}^1} & \dots & \frac{\partial(VPL_{I_{ni}})_j}{\partial x_{I_{ni}}^1} \\ \frac{\partial(VPL_{P_1})_j}{\partial x_{I_{ni}}^2} & \frac{\partial(VPL_{P_2})_j}{\partial x_{I_{ni}}^2} & \dots & \frac{\partial(VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{I_{ni}}^2} & \frac{\partial(VPL_{I_1})_j}{\partial x_{I_{ni}}^2} & \dots & \frac{\partial(VPL_{I_{ni}})_j}{\partial x_{I_{ni}}^2} \\ \frac{\partial(VPL_{P_1})_j}{\partial x_{I_{ni}}^3} & \frac{\partial(VPL_{P_2})_j}{\partial x_{I_{ni}}^3} & \dots & \frac{\partial(VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{I_{ni}}^3} & \frac{\partial(VPL_{I_1})_j}{\partial x_{I_{ni}}^3} & \dots & \frac{\partial(VPL_{I_{ni}})_j}{\partial x_{I_{ni}}^3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

8. Aproximação do vetor gradiente.

$$g = \sum_{w=1}^{N_w} G_{xVPL_w} \cdot \tag{12}$$

2.3 Refinamento da matriz de sensibilidade

Por simplicidade de notação a matriz de sensibilidade sem refinamento pode ser escrita por blocos:

$$G_{xVPL_w} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial VPL_{P_j}}{\partial x_{P_j}} \right)_j & \left(\frac{\partial VPL_{I_i}}{\partial x_{P_j}} \right)_j \\ \left(\frac{\partial VPL_{P_j}}{\partial x_{I_i}} \right)_j & \left(\frac{\partial VPL_{I_i}}{\partial x_{I_i}} \right)_j \end{bmatrix}; \begin{matrix} P_j = P_1 \cdots P_{np} \\ I_i = I_1 \cdots I_{ni} \\ j = 1 \cdots N_c \end{matrix} \tag{13}$$

Na Eq. (13) $j, N_v, P_j, I_i, x_{I_j}^i, x_{P_j}^j$ são j-ésimo ciclo de controle, número de válvulas de controle, P_j -ésimo poço produtor, I_i -ésimo poço injetor, i-ésima válvula de controle do poço produtor P_j , i-ésima válvula de controle do poço injetor I_i , respectivamente. Estudaremos a matriz de sensibilidade analisando a influência das diferentes variáveis de controle sobre o VPL dos diferentes poços para possíveis refinamentos.

1. Sensibilidade do VPL do poço produtor devido aos controles dos produtores.

A sensibilidade de um poço com suas próprias variáveis tem uma forte variabilidade sobre o cálculo do próprio VPL, sendo mantidas. Alguma mudança no controle das válvulas do próprio poço resulta em mudanças do próprio VPL. A mudança no controle das válvulas de outros poços produtores afeta o VPL para um dado produtor unicamente devido a possíveis reduções de pressão causado pela retirada de fluido. Por estas razões é necessária uma medida para controles que estão fora da área local do poço (Chen e Oliver, 2012). A sensibilidade média com respeito às variáveis de controle dos outros poços produtores é unicamente uma medida espacial, necessita ser obtida para cada ciclo de controle. Na Eq. (15) N_{vp}, N_{vp_j} são o número de válvulas dos todos os produtores e do produtor j , respectivamente.

$$\gamma_{P_j}^j = \frac{1}{N_{vP} - N_{vP_j}} \sum_{\substack{x_{P_k}^i \notin P_j \\ P_k \neq P_j}} \frac{\partial (VPL_{P_j})_j}{\partial x_{P_j}^i}; \quad j = 1, \dots, N_c \quad (14)$$

$$i = 1, \dots, N_v$$

$$\frac{\partial (VPL_{P_j})_j^{ref}}{\partial x_{P_j}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial (VPL_{P_1})_j}{\partial x_{P_1}^1} & \gamma_2^j & \dots & \gamma_{np}^j \\ \frac{\partial (VPL_{P_1})_j}{\partial x_{P_1}^2} & \gamma_2^j & \dots & \gamma_{np}^j \\ \frac{\partial (VPL_{P_1})_j}{\partial x_{P_1}^3} & \gamma_2^j & \dots & \vdots \\ \gamma_1^j & \frac{\partial (VPL_{P_2})_j}{\partial x_{P_2}^1} & \dots & \gamma_{np}^j \\ \gamma_1^j & \frac{\partial (VPL_{P_2})_j}{\partial x_{P_2}^2} & \dots & \gamma_{np}^j \\ \gamma_1^j & \frac{\partial (VPL_{P_2})_j}{\partial x_{P_2}^3} & \dots & \gamma_{np}^j \\ \gamma_1^j & \gamma_2^j & \dots & \gamma_{np}^j \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \gamma_1^j & \gamma_2^j & \dots & \gamma_{np}^j \\ \gamma_1^j & \gamma_2^j & \dots & \frac{\partial (VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{P_{np}}^1} \\ \gamma_1^j & \gamma_2^j & \dots & \frac{\partial (VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{P_{np}}^2} \\ \gamma_1^j & \gamma_2^j & \dots & \frac{\partial (VPL_{P_{np}})_j}{\partial x_{P_{np}}^3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

2. **Sensibilidade do VPL do poço injetor devido as variáveis de controle das válvulas dos poços produtores.** A sensibilidade do VPL de um poço injetor com as variáveis de controle de um poço produtor é zero, porque mudanças abruptas ou não no controle das variáveis dos produtores não afeta o VPL do poço injetor.

$$\frac{\partial \left(\overset{ref}{VPL}_{I_j} \right)}{\partial x_{P_j}} = [0^j] \quad ; \quad j = 1, \dots, N_c. \quad (16)$$

- 3. Sensibilidade do VPL do poço injetor devido aos controles dos injetores.**
 Neste caso é admitido que a única influência sobre o VPL dos poços injetores é com respeito a suas variáveis de controle, sem influencia de controles de outros poços injetores, em um dado poço injetor.

$$\frac{\partial \overset{ref}{VPL}_{I_j}}{\partial x_{I_i}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \left(\overset{ref}{VPL}_{I_1} \right)_j}{\partial x_{I_1}^1} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\partial \left(\overset{ref}{VPL}_{I_1} \right)_j}{\partial x_{I_1}^2} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\partial \left(\overset{ref}{VPL}_{I_1} \right)_j}{\partial x_{I_1}^3} & 0 & \dots & \vdots \\ 0 & \frac{\partial \left(\overset{ref}{VPL}_{I_2} \right)_j}{\partial x_{I_2}^1} & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial \left(\overset{ref}{VPL}_{I_2} \right)_j}{\partial x_{I_2}^2} & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\partial \left(\overset{ref}{VPL}_{I_2} \right)_j}{\partial x_{I_2}^3} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial \left(\overset{ref}{VPL}_{I_{ni}} \right)_j}{\partial x_{I_{ni}}^1} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial \left(\overset{ref}{VPL}_{I_{ni}} \right)_j}{\partial x_{I_{ni}}^2} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\partial \left(\overset{ref}{VPL}_{I_{ni}} \right)_j}{\partial x_{I_{ni}}^3} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

4. Sensibilidade do VPL do poço produtor devido aos controles dos injetores.

Chen e Oliver, (2012) explicam que a influência dos poços injetores em produtores é global; por estas razões não é necessário nenhuma ação de refinamento.

Após do refinamento, a matriz de sensibilidade pode ser expressa:

$$G_{xVPL_w}^{ref} = \begin{bmatrix} \frac{(\partial VPL_{P_j})_j^{ref}}{\partial x_{P_j}} & \frac{(\partial VPL_{I_i})_j^{ref}}{\partial x_{P_j}} \\ \frac{(\partial VPL_{P_j})_j^{ref}}{\partial x_{I_i}} & \frac{(\partial VPL_{I_i})_j^{ref}}{\partial x_{I_i}} \end{bmatrix}; \begin{matrix} P_j = P_1 \cdots P_{np} \\ I_i = I_1 \cdots I_{ni} \\ j = 1 \cdots N \end{matrix} \quad (18)$$

O vetor gradiente refinado pode ser obtido da soma das colunas do refinamento da matriz de sensibilidade.

3 EXEMPLO ILUSTRATIVO

Para comparar a eficiência de utilizar a matriz de sensibilidade com ou sem refinamento na aproximação do vetor gradiente. Neste trabalho apresentamos o modelo sintético de reservatórios Brush Canyon Outcrop com múltiplas completações (BCO-Mwells). O modelo apresenta seis camadas, com 55x53 blocos distribuídos em três zonas (Tabela 1). O número de poços é 12 (Sete produtores e cinco injetores), cada poço com três válvulas de controle. A permeabilidade varia de 157-2592 mDarcy (Fig.1), A permeabilidade vertical é 30% da permeabilidade horizontal, a porosidade varia entre 16-28% e viscosidade de 0.11 centipoise.

O processo de otimização inicia o primeiro dia para maximizar o VPL do campo em 24 anos. Os parâmetros utilizados para calcular o VPL são o preço de óleo USD 25\$/m³, água injetada USD 2\$/m³ e água produzida USD 5 \$/m³ e taxa de desconto anual de 9.3%. Os parâmetros de controle são as vazões de injeção e produção em cada válvula de controle. O número de variáveis de controle são 36x6=216

Tabela 1. Distribuição de zonas

Zonas	Camadas
Zona 1	1, 2 e 3
Zona 2	4 e 5
Zona 3	6

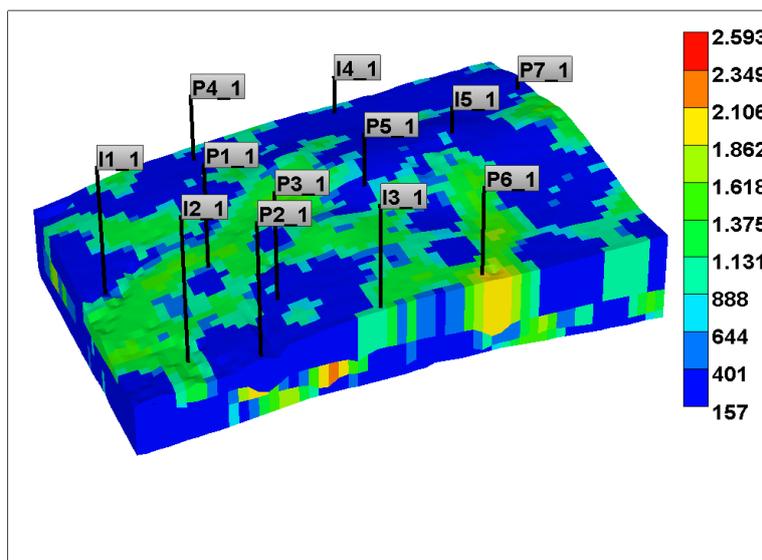


Figura 1. Permeabilidade do modelo BCO-Mwells na direção I.

4 RESULTADOS

A técnica de otimização usada para maximizar o modelo BCO-Mwells foi programação quadrática sequencial do tool-box de otimização Matlab (Matlab, 2014). As simulações foram executadas utilizando o simulador de reservatórios IMEX da *Computer Modeling Group* (CMG, 2015). Os membros do ensemble foram gerados a partir da função de correlação Gaussiana, tamanho de correlação igual a 6 e desvio padrão 10% (Tueros et.al., 2015). No processo de otimização os controles iniciais das válvulas de controle são 0.264% da vazão máxima nos poços produtores e 0.255% da vazão máxima do poço injetor, O VPL para este caso inicial é 2.62×10^8 . Os resultados são apresentados nos seguintes casos.

Caso 1: As válvulas de controle podem atuar com uma vazão máxima igual ao poço. O vetor gradiente é aproximado utilizando ensemble de tamanhos três e quatro realizações. O método baseado em ensemble é de natureza estocástica, porém, para ter comparações eficientes são necessários 20 execuções do processo de otimização. Os resultados são mostrados na Fig. (2), onde os limites do Box-plot são 25% e 75% quartil, a linha no Box-plot representa a mediana e as linhas extremas os valores mínimos e máximos.

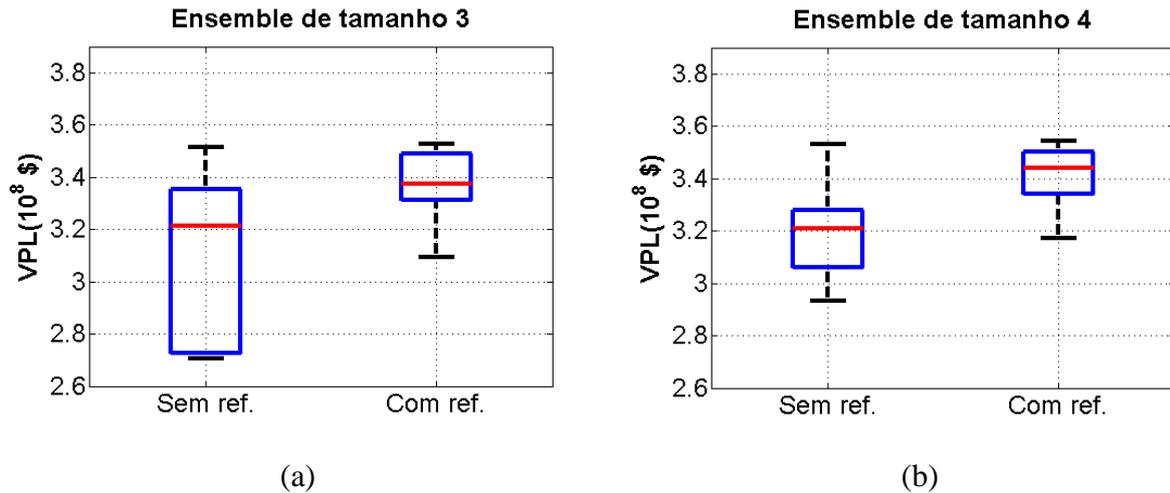


Figura 2. Box plot com ensemble de tamanhos diferentes, (a) tamanho do ensemble=3; (b) tamanho de ensemble=4

Figura 2(a) mostra um ganho de 5% entre os valores da mediana sem refinamento (Sem ref.) e com refinamento (Com ref.), também observamos uma redução substancial da variabilidade. O ganho utilizando ensemble de tamanho quatro é de 7.7%. Observamos que utilizar a matriz de sensibilidade com refinamento apresenta ganho para o processo da otimização.

Caso 2: As válvulas de controle apresentam restrições de vazão máxima, 50% da vazão máxima do poço. Estas restrições são impostas para evitar possíveis perdas de pressão na zona de produção e que possa atender a produção indicada pelo otimizador. Os resultados do processo de otimização são apresentados na Fig. (3).

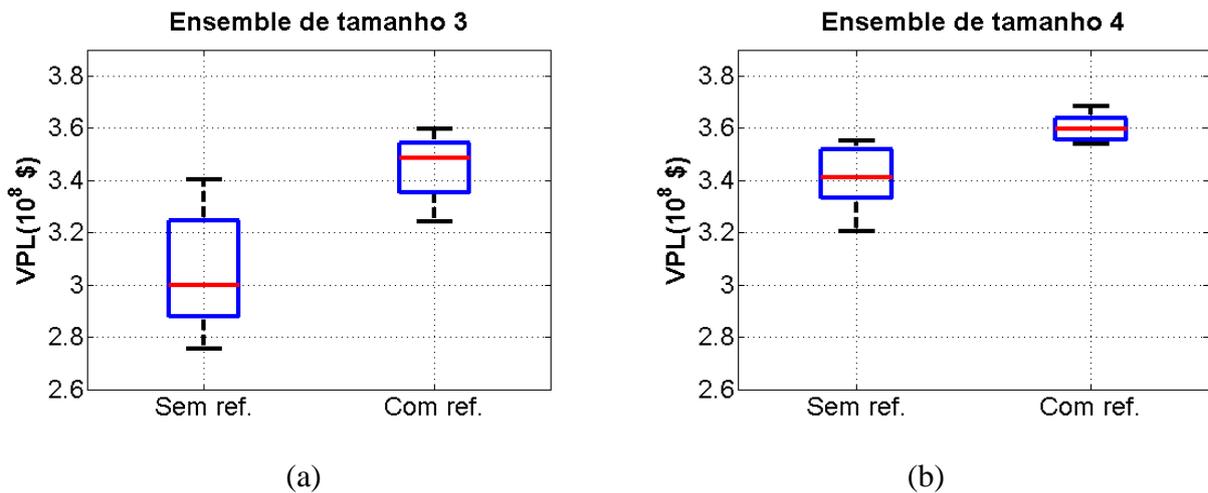


Figura 3. Resultado de otimização em Box plot com ensemble de tamanhos diferentes, (a) tamanho do ensemble=3; (b) tamanho de ensemble=4.

Figura 3 (a) mostra que utilizar um ensemble de três realizações para aproximar o vetor gradiente (com refinamento) no processo de otimização, obtemos um ganho de 16.3% entre as medianas. O ganho obtido utilizando ensemble de quatro realizações é 5.4%. Em todos os casos foi reduzida a variabilidade.

5 CONCLUSÕES

Técnicas de refinamento utilizadas na matriz de sensibilidade para aproximar o vetor gradiente usando o método baseado em ensemble foram apresentadas.

A sensibilidade do VPL do poço produtor com respeito às variáveis de controle dos produtores é refinado, mantendo os coeficientes de cada poço com seus próprios controle e uma media dos controles de outros produtores.

A sensibilidade do VPL do poço injetor com respeito aos controles dos produtores e outros poços injetores são zeros, desde que seja verificado que não houve problemas de injeção tornando os controles de poços injetores independentes.

Utilizar restrições nas válvulas de controle mostra resultados mais eficientes no processo de otimização. Os resultados obtidos mostram que as técnicas de refinamento propostas são muito eficazes, mostrando ganho de 16.3%, utilizando um ensemble de 3 realizações e com redução da variabilidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o suporte financeiro para esta pesquisa ao Programa de Recursos Humanos, PRH-26, PETROBRAS e Fundação CMG.

REFERENCIAS

- Brouwer, D. R., Jansen, J. D., van der Starre, S., van Kruijsdijk, C. P. J. W., & Berentsen, C. W. J. (2001, January 1). Recovery Increase through Water Flooding with Smart Well Technology. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/68979-MS.
- Brouwer, D.R. and Jansen, J, -D. 2004. Dynamic Optimization of Water Flooding With Smart Wells Using Optimal Control Theory. SPE J.9 (4): 391-402. SPE -78278-PA. doi:10.2118/78278-PA.
- Chen, Y., & Oliver, D. S. (2012, March 1). Localization of Ensemble-Based Control-Setting Updates for Production Optimization. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/125042-PA.
- Computer Modeling Group LTD., 2015. IMEX: User' s Guide. Calgary Canada.
- Emerick, A. A., & Portella, R. C. M. (2007, January 1). Production Optimization With Intelligent Wells. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/107261-MS.
- Gao, C. H., Rajeswaran, R. T., & Nakagawa, E. Y. (2007, January 1). A Literature Review on Smart Well Technology. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/106011-MS
- Glandt, C. A. (2005, December 1). Reservoir Management Employing Smart Wells: A Review. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/81107-PA.
- MATLAB'S Optimization Toolbox User's Guide, R2014a.
- Meshioye, O., Mackay, E., Ekeoma, E., & Martinez, C. (2010, January 1). Optimization of Waterflooding Using Smart Well Technology. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/136996-MS.

- Su, H.-J. (2009, January 1). Smart Well Production Optimization Using an Ensemble-Based Method. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/126072-MS.
- Tueros, J, Horowitz, B. and Willmersdorf, R., 2016. CONSTRAINED WATERFLOODING OPTIMIZATION USING AN EMSEMBLE-BASED METHOD WITH SENSITIVITY REFINEMENT. In: Proceedings of the International Conference in Engineering Optimization, Iguassu Falls, Brazil.
- Tueros J.A.R., Horowitz, B. and Willmersdorf, R., 2015. NUMERICAL EXPERIENCE WITH AN ENSEMBLE-BASED METHOD FOR CONSTRIINED WATERFLOONDING OPTIMIZATION, CILAMCE 2015, Congresso Ibero Americano em Métodos Computacionais em Engenharia, Rio Janeiro, RJ, 22-25, Novembro 2015. doi:10.20906/CPS/CILAMCE2015-0498.
- Valestrand, R., Khrulenko, A., & Hatzignatiou, D. G. (2014, April 2). Smart Wells for Improved Water Management in the Presence of Geological Uncertainty. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/169223-MS.