

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ESTRATÉGIA LOCAL PARA OTIMIZAÇÃO DO GERENCIAMENTO DE INJEÇÃO DE ÁGUA

AUTORES:

Carlos V. P. Mendonça, Neílson F. P. Carvalho, Silvana M. B. Afonso e Bernardo Horowitz

INSTITUIÇÃO:

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco – Recife, PE

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

ESTRATÉGIA LOCAL PARA OTIMIZAÇÃO DO GERENCIAMENTO DE INJEÇÃO DE ÁGUA

Abstract

In this work the waterflooding (WF) problem will be tackled which is by far the most commonly used method to improve oil recovery after depletion. A local strategy named, sequential approximate optimization strategy (SAO) is employed to solve the dynamic optimization of oil production scheduling considering constraints at platform's total rate. The Net Present Value (NPV) is maximized and the design variables are the rates of water injection wells and total fluids rates of producer wells. Due to the high computational cost in the numerical simulation involved in each function evaluation surrogate models are constructed and used exclusively during the course of the optimization process. A study is undertaken in order to provide guidance on the parameter settings for the SAO methodology.

Introdução

Injeção de água é de longe o método mais empregado para melhorar a recuperação secundária, devido ao seu baixo custo. Apesar das muitas características favoráveis a heterogeneidade, contraste de permeabilidade em particular, pode ter efeito negativo no seu desempenho. É conhecido o fato de que a presença de canais de alta permeabilidade pode reduzir a eficiência do varrido levando a eclosão prematura de água nos poços produtores. Uma das formas de combater o impacto negativo da heterogeneidade e melhorar a eficiência do varrido é através da otimização da alocação de vazões entre os poços injetores e produtores. Durante o processo de otimização repetidas avaliações de funções são necessárias. Como cada avaliação de função requer simulação completa do reservatório que envolve alto custo computacional a direta utilização de simuladores numéricos nos algoritmos de otimização torna-se inviável. Estratégias de aproximação são alternativas comumente empregadas para contornar este problema. Neste trabalho modelos substitutos são construídos utilizando técnicas de ajustamento de superfícies através do procedimento de Krigagem. Para isto é inicialmente necessário um planejamento de amostragem utilizando técnicas robustas de Projeto de Experimento tais como Hipercubo Latino (LHS), Sequências Quase Monte Carlo (QMC) e Ladrilhamento Centroidal de Voronoi Latinizado (LCVT). O algoritmo de otimização utiliza exclusivamente o modelo substituto aproximado. Neste trabalho é utilizada a estratégia de Otimização Sequencial Aproximada para resolver o problema de gerenciamento da injeção de água em reservatório de petróleo. Nesta estratégia a solução é obtida através da solução sequencial de subproblemas restritos a sub-regiões de confiança adaptativamente ajustadas em função do desempenho preditivo do modelo substituto. Vários são os parâmetros necessários ao processamento tais como: tamanho inicial da região de confiança, número de amostras em cada sub-região, ponto inicial entre outros. O otimizador de escolha é o da Programação Quadrática Sucessiva. Neste problema as variáveis de projeto são as taxas de alocação das vazões entre poços produtores e injetores e a função objetivo é o Valor Presente Líquido. Um exemplo ilustrativo é apresentado onde são estudados casos envolvendo diferentes números de variáveis de projeto resultante de números distintos de ciclos controle. São considerados também diferentes tipos de restrições de controle nos poços tais como máximo corte de água e/ou pressão de fundo de poço.

Metodologia

O problema de injeção de água consiste em determinar as vazões nos poços injetores e produtores de forma a maximizar o Valor Presente Líquido durante todo o ciclo de vida do reservatório. As

restrições de projeto limitam a vazão total de injeção de água e a soma das vazões de fluidos dos poços produtores às capacidades operacionais dos equipamentos de superfície. É ainda imposta restrição do tipo “voidage replacement” de modo a manter a apropriada pressurização do reservatório.

O problema pode ser formulado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar}_{\mathbf{q}} \quad & f(q_{p,t}, \mathbf{u}) = \sum_{\tau=0}^T \left[\frac{1}{(1+d)^\tau} F_\tau(q_{p,t}, \mathbf{u}) \right] \\ \text{Sujeito a:} \quad & \sum_{p \in P} (q_{p,t}^o + q_{p,t}^w) \leq Q_{l,\max} \quad t = 1 \dots n_t \\ & \sum_{p \in I} q_{p,t}^{inj} \leq Q_{inj,\max} \quad t = 1 \dots n_t \\ & B_w \sum_{p \in I} q_{p,t}^w = B_o \sum_{p \in P} q_{p,t}^o + B_w \sum_{p \in P} q_{p,t}^w \quad t = 1 \dots n_t \\ & q_{p,t}^l \leq q_{p,t} \leq q_{p,t}^u \quad t = 1 \dots n_t \end{aligned}$$

Onde: $q_{p,t}$ = vazão do poço p , no intervalo de tempo t ; $\mathbf{u}$ = variáveis de estado; d = taxa de desconto; F_τ = fluxo de caixa. Admitindo-se o funcionamento “topado” das linhas de injeção e produção, tem-se:

$$\sum_{p \in P} (q_{p,t}^o + q_{p,t}^w) = Q_{l,\max} \quad \text{e} \quad \sum_{p \in I} q_{p,t}^{inj} = Q_{inj,\max}, \quad t = 1 \dots n_t$$

Definindo:

$$x_{p,t} = q_{p,t} / Q_{l,\max}, \quad p \in P \quad \text{e} \quad x_{p,t} = q_{p,t} / Q_{inj,\max}, \quad p \in I$$

pode-se reescrever o problema de injeção de água como:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar}_{\mathbf{x}} \quad & f(x_{p,t}, \mathbf{u}) = \sum_{\tau=0}^T \left[\frac{1}{(1+d)^\tau} F_\tau(x_{p,t}, \mathbf{u}) \right] \\ \text{Sujeito a:} \quad & \sum_{p \in P} x_{p,t} = 1 \quad t = 1 \dots n_t \\ & \sum_{p \in I} x_{p,t} = 1 \quad t = 1 \dots n_t \\ & x_{p,t}^l \leq x_{p,t} \leq x_{p,t}^u \quad t = 1 \dots n_t \end{aligned}$$

Como pode ser facilmente constatado as duas primeiras restrições de igualdade permitem reduzir de dois a dimensão do problema. Neste trabalho os valores do VPL são calculados com base na simulação numérica de reservatório utilizando o IMEX, software comercial da CMG [1].

Modelo Substituto

Estratégias de aproximação são apontadas como uma poderosa ferramenta para superar problemas de otimização práticos de engenharia (Forrester et al, 2008). A idéia básica é construir uma simplificação matemática baseada em modelos substitutos para o problema original.

Os modelos substitutos aqui criados utilizam técnicas de ajuste de superfícies, que envolvem as seguintes fases: geração de amostra representativa do espaço de projeto (Design of Experiments -

DOE); ajuste de superfície ao espaço amostral; desenvolvimento de expressões para preditores das funções.

Na referência (Afonso et al, 2008), nove modelos aproximados foram criados para o problema em estudo utilizando as seguintes combinações: três esquemas distintos para projeto de experimentos (Seqüências Quase Monte Carlo (QMC), Ladrilhamento Centroidal de Voronoi Latinizado (LCVT), Hipercubo latino (LHS)) e três esquemas distintos para o ajuste de superfície (Krigagem, MARS (Multipoint Adaptive Regression Splines) e Processo Gaussiano). Objetivando a verificação dos modelos criados a métrica do erro médio quadrado (root mean square error – RMSE) foi calculada em uma malha de 11x11 pontos igualmente espaçados. A partir dos resultados obtidos a melhor combinação foi LCVT-kriging. Portanto, para os estudos de otimização apresentados neste trabalho é considerada esta combinação.

Estratégia Local

Tipicamente, a metodologia SAO decompõe o problema original de otimização em seqüências de subproblemas, confinados a uma sub-região do espaço de projeto, denominada Região de Confiança (RC). Os modelos substitutos (baixo custo) são criados e usados pelo otimizador.

Um esquema de atualização da região de confiança proposto em (Alexandrov et al, 1997) é usado para calcular os limites das variáveis de projetos em cada subproblema (iteração do SAO). Matematicamente cada subproblema pode ser definido como:

$$\text{Minimizar (ou maximizar)} \quad \hat{f}^k(x)$$

$$\text{Sujeito à:} \quad \hat{g}_i^k(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_l \leq x_l^k \leq x \leq x_u^k \leq x_u, \quad k = 0, 1, 2, \dots, k_{\max}$$

$$\text{Onde} \quad x_l^k = x_c^k - \Delta^k \quad x_u^k = x_u^k + \Delta^k$$

Cada subproblema descrito acima define uma iteração do SAO. Uma RC inicial é pré-determinada e em cada iteração a mesma é adaptativamente atualizada, utilizando aferições entre modelo local e real no centro da região de confiança. Este processo continua até a convergência, os principais passos do algoritmo SAO são:

- [1] Determinar a RC inicial,
- [2] Computar as funções objetivas e restrições no ponto central da RC utilizando o modelo real,
- [3] Construir modelos substitutos para as funções objetiva/restrrição na subregião em questão,
- [4] Otimizar no interior da RC utilizando os modelos substitutos,
- [5] Computar a função objetiva/restrrição (modelo real) no ponto de ótimo identificado em [4],
- [6] Verificar critério de parada,
- [7] Atualizar a RC de acordo com a precisão do modelo aproximado, e voltar para [3].

Descrição do Problema-teste

O problema-teste utilizado nesta etapa do projeto foi o Caso 1 da referência (Oliveira, 2006). Considere o campo mostrado abaixo com três poços: dois produtores e um injetor. A permeabilidade próximo ao poço P-1 é 500mD enquanto que próximo a P-2 é de 1500mD. O poço injetor tem vazão constante de 44m³/dia enquanto que a soma das vazões dos poços produtores é de 40m³/dia.

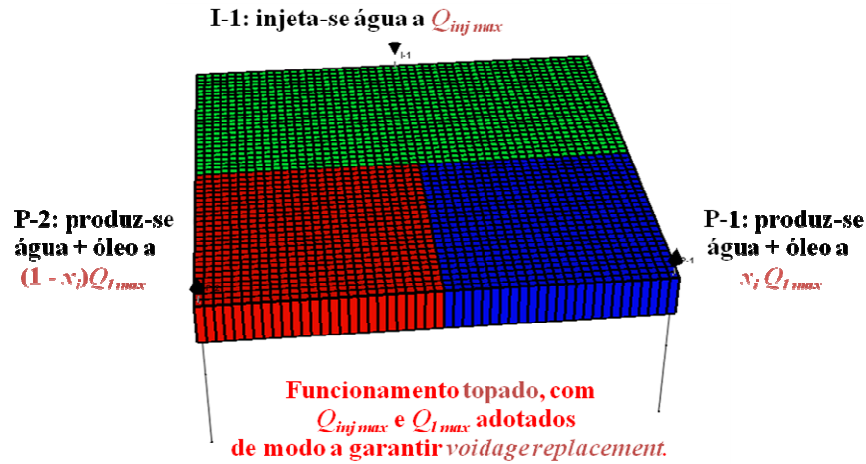


Figura 1. Reservatório do problema-teste.

O problema pode ser formulado com:

$$\begin{aligned} &\underset{x \in \mathbb{R}^n}{\text{Minimize}} && -VPL(x) \\ &\text{Sujeito a:} && 0.25 \leq x_i \leq 0.75, \ i = 1..n \end{aligned}$$

onde x_i = fração da vazão de fluidos em P-1 no i-ésimo ciclo de controle; n = número de ciclos de controle. O número de variáveis é igual ao número de ciclos de controle utilizado ao longo do tempo de concessão, tal como indicado na Figura 2.

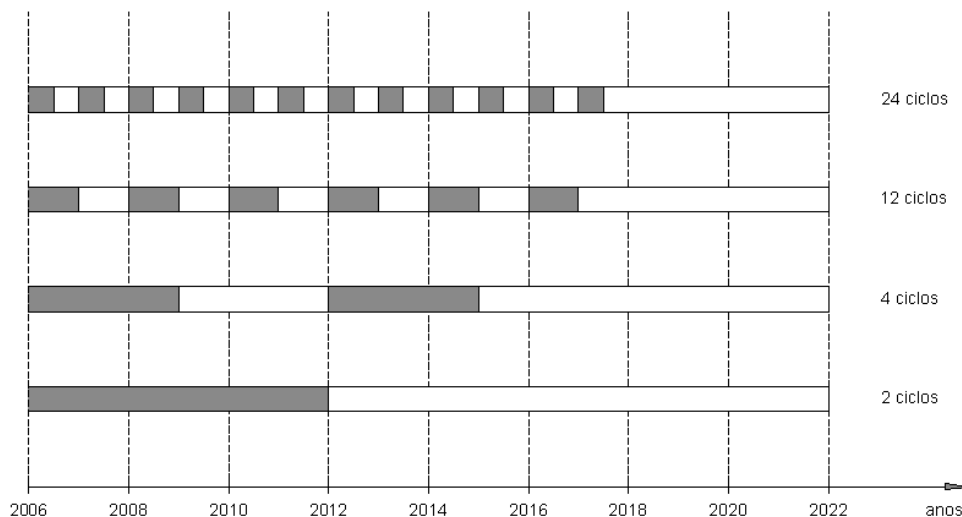


Figura 2. Ciclos de controle no período de concessão.

Estudo Paramétrico da Estratégia Local

São feitos estudos de vários parâmetros da estratégia de otimização local, tais como: ponto inicial, tamanho inicial da RC, números de amostras e tolerância de convergência. Objetivando guiar uma

seleção de valores apropriada para tais parâmetros. Para o exemplo em análise, diferentes casos de restrições serão aplicados aos poços produtores (Corte de Água (CA), Pressão de Fundo de Poço (PFP)) e diferentes números de variáveis de projeto são apresentadas. As especificações dos diferentes casos analisados neste estudo estão apresentadas na Tabela 1.

Casos estudados					
Número de variáveis	Restrições dos poços produtores	Amostras	Tamanho inicial da região de confiança	Limite de convergência	Tolerância de convergência
2, 4	Nenhuma (caso C1)	2n+1, 4n	0.10, 0.15, 0.20	2, 5	10^{-4} , 10^{-5}
	CA (caso C2)				
	CA – PFP (caso C3)				
12, 24	Nenhuma (caso C1)	2n+1, 4n, 5n	0.10, 0.15, 0.20	2, 5	10^{-4} , 10^{-5}
	CA (caso C2)				
	CA – PFP (caso C3)				

Tabela 1. Casos estudados para o problema-teste1.

Resultados e Discussão

No que segue são apresentados o estudo dos parâmetros aqui investigados na obtenção da solução otimizada.

Ponto Inicial

Nas estratégias locais, o algoritmo de otimização geralmente converge para o ponto de mínimo local mais próximo do ponto inicial. Isto foi observado em vários casos durante o presente estudo. Um exemplo para o caso de quatro variáveis de projeto é ilustrado na Tabela 2. Assim, recomenda-se usar diferentes pontos de partida. Foi também observado que a idéia de se utilizar resultados de soluções prévias, obtidas com um menor número de variáveis de projeto, só resultou no melhor ótimo para o caso com maior número de variáveis (24).

Projeto Inicial				Projeto Final				SAO Iterações	VPL (x 10^6)
x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄		
0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.562	0.739	0.562	8	1.49282
0.25	0.25	0.75	0.75	0.381	0.572	0.665	0.591	9	1.49266

Tabela 2. Influência do ponto inicial na solução ótima.

Para o caso envolvendo 24 variáveis de projeto a melhor solução encontrada neste estudo foi $1,4936 \times 10^6$ enquanto que a melhor solução encontrada em (Oliveira, 2006) foi de $1,4937 \times 10^6$. As pequenas diferenças entre as soluções obtidas podem ser atribuídas aos valores de tolerância utilizados no procedimento numérico de solução do simulador.

Tamanho inicial da Região de Confiança

Durante o processo iterativo da estratégia SAO, a RC é adaptativamente atualizada. No entanto, foi observado durante o curso do presente estudo uma considerável influência do tamanho inicial da RC na qualidade da solução obtida.

Como podem ser observado na Tabela 3, nas situações onde não foram impostas restrições de controle nos poços, os melhores resultados foram obtidos para os maiores valores iniciais da RC.

Melhores Soluções							
Número de Variáveis	Casos	Amostras	Tamanho inicial da região de confiança	Iteração SAO	Limite de convergência	Tolerância de convergência	VPL ($\times 10^6$)
2	Caso C1	5 ($2n+1$)	0.15	11	5	10^{-5}	1,4925
	Caso C2	5 ($2n+1$)	0.15	10	5	10^{-5}	1,6450
	Caso C3	5 ($2n+1$)	0.20	20	5	10^{-5}	1,6138
4	Caso C1	9 ($2n+1$)	0.20	18	5	10^{-5}	1,4929
	Caso C2	9 ($2n+1$)	0.10	15	5	10^{-5}	1,6480
	Caso C3	9 ($2n+1$)	0.10	20	5	10^{-5}	1,6139
12	Caso C1	25 ($2n+1$)	0.20	20	5	10^{-5}	1,4935
	Caso C2	25 ($2n+1$)	0.15	16	5	10^{-5}	1,6530
	Caso C3	25 ($2n+1$)	0.15	9	5	10^{-5}	1,6139
24	Caso C1	120 ($5n$)	0.20	6	5	10^{-5}	1,4936
	Caso C2	49 ($2n+1$)	0.10	7	5	10^{-5}	1,6541
	Caso C3	96 ($4n$)	0.15	11	5	10^{-5}	1,6141

Tabela 3. Tabela resumo com os parâmetros dos ótimos locais.

Número de Amostras na Região de Confiança

Um dos aspectos importantes na estratégia SAO é a escolha do número de amostras necessário para construir o modelo substituto no interior da RC em cada iteração, uma vez que isto tem um impacto direto no esforço computacional requerido. Vale destacar que para a construção de um modelo quadrático completo é necessário a construção de uma amostra com $(n+1)(n+2)/2$ pontos, o que resultaria em 325 pontos para o caso de 24 variáveis o que representa um número significativo de simulações em uma iteração. Como pode ser observado na Tabela 3, na maioria dos casos, a amostra $2n+1$ produziu os melhores resultados. Para o exemplo com maior número de variáveis de projeto (24) para o caso C1, a melhor solução foi obtida considerando o caso $5n$, porém, mesmo neste caso a solução obtida com $2n+1$ amostras diferiu apenas no valor do quarto algarismo significativo como mostrado na Tabela 4.

Caso C1						
24 Variáveis						
Ponto Inicial	Amostras	Tamanho inicial da RC	Tolerância de convergência	Limite de convergência	Iteração SBO	VPL ($\times 10^6$)
1	120	0.20	10^{-5}	5	6	1,49360
1	49	0.15	10^{-5}	5	5	1,49352

Tabela 4. Caso C1 com 24 variáveis de projeto.

Tolerâncias de convergência

No SAO do DAKOTA toolkit [6] são possíveis dois controles da convergência: a própria tolerância de convergência usada numa avaliação do SAO (Tolerância de Convergência) e número de iterações consecutivas com melhora menor que a tolerância de convergência (Limite de Convergência). As seguintes tolerâncias foram testadas: limite 2 e 5, tolerância (10^{-4} e 10^{-5}). Como pode ser visto na Tabela 3, todos os melhores ótimos foram obtidos quando foram exigidos os maiores valores de convergência.

Desempenho das soluções

O histórico das iterações da estratégia SAO, para o caso C1 (sem restrição nos poços), para todos os ciclos de controle observados, é apresentado na Figura 3. Observar a rápida redução do VPL nas primeiras iterações.

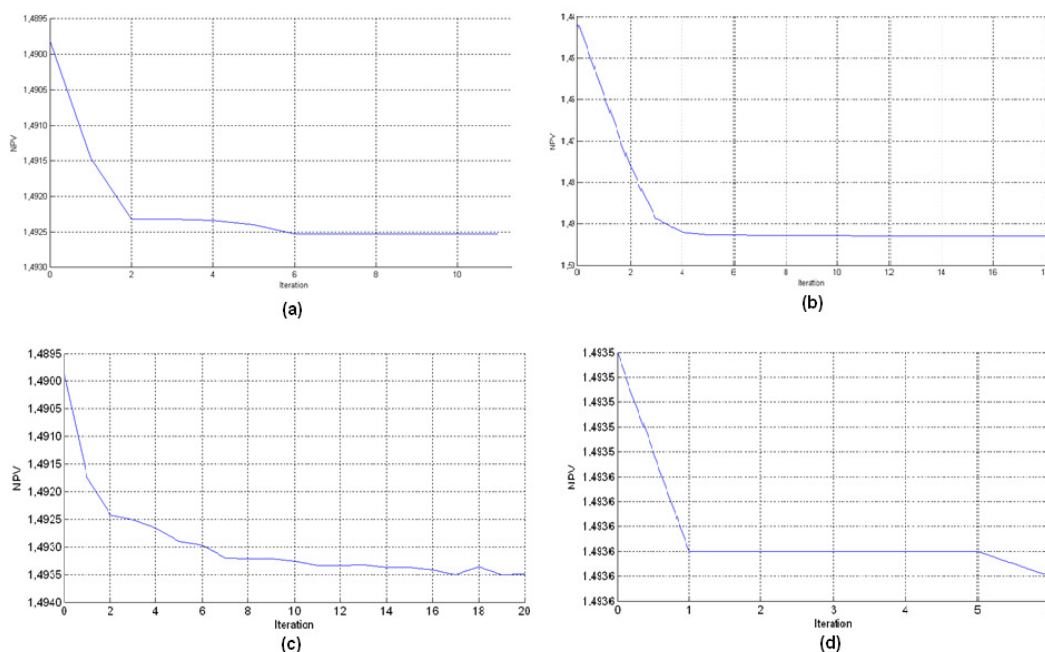


Figura 3. Histórico das iterações da estratégia SAO: (a) 2 ciclos de controle, (b) 4 ciclos de controle, (c) 12 ciclos de controle e (d) 24 ciclos de controle.

Conclusões

As simulações numéricas associadas ao problema de Engenharia de Reservatório demandam muito tempo e grande custo computacional. A construção de modelos substitutos apresenta-se como uma poderosa estratégia para contornar tais problemas.

No presente estudo a estratégia local da otimização sequencial aproximada, técnica onde a função substituta é construída e otimizada dentro de sub-regiões de confiança adaptativamente ajustadas em função do desempenho preditivo do modelo substituto foi utilizada objetivando a determinação dos rateios ótimos das vazões dos poços produtores. Um vasto estudo paramétrico para diferentes condições de controle nos poços foram conduzidos. As principais recomendações baseadas no presente estudo são as que seguem:

- Para problemas suaves usar o tamanho inicial da região de confiança de 0.20 do intervalo de das variáveis de projeto, caso contrário use 0.10.

- Em geral, iniciar com $2n+1$ amostras dentro da região de confiança;
- Utilizar os maiores valores para a tolerância e o limite da tolerância apresentados neste estudo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da Agência Nacional do Petróleo (ANP) através do Programa de Recursos Humanos (PRH-26), ao CNPq e a rede temática SIGER da Petrobrás.

Referências Bibliográficas

- [1] COMPUTER MODELING GROUP LTD. *IMEX: User's Guide*. Calgary – Canadá, 2006.
- [2] FORRESTER, A.; SOBSTER A.; KEANE A. *Engineering Design Via Surrogate Modelling: A Practical Guide*. United Kingdom: Wiley, 2008. 218p.
- [3] AFONSO, S.M.B.; HOROWITZ, B.; WILLMERSDORF, R.B. Comparative Study of Surrogate Models for Engineering Problems. In: ASMO_UK/ISSMO INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN OPTIMIZATION, 7th, 2008, Bath-UK.
- [4] ALEXANDROV, N.; DENNIS JR., J. E.; LEWISAND, R.M.; TOREZON, V. **A Trust Region Framework for Managing the Use of Approximation Models in Optimization**. NASA/CR-201745; ICASE Report No. 97-50, 1997.
- [5] OLIVEIRA, Diego F. B. de. **Técnicas de Otimização da Produção para Reservatórios de Petróleo**: Abordagem Sem Uso de Derivadas para Alocação Dinâmica das Vazões de Produção e Injeção. 2006. 138f. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.
- [6] SANDIA NATIONAL LABORATORY. *Reference Manual of DAKOTA, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis*. Albuquerque - USA, 2008. 157p.