

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Uso de Ferramenta Integrada em Otimização de Problemas da Engenharia de Reservatório utilizando Modelo Substituto

AUTORES:

Jefferson W. O. Pinto, Silvana M. B. Afonso

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Pernambuco

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. 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 6ºPDPETRO.

USO DE FERRAMENTA INTEGRADA EM OTIMIZAÇÃO DE PROBLEMAS DA ENGENHARIA DE RESERVATÓRIO UTILIZANDO MODELO SUBSTITUTO

Abstract

In reservoir engineering applications, one area of interest is the dynamic optimization of oil production scheduling, where it seeks the highest Net Present Value (NPV) considering constraints at platform's total rate. In the optimization process repeated numerical simulations in the reservoir are carried out and due to the high computational cost of each simulation, approximation techniques are studied to try to overcome such problem. In this work the optimization tools are applied considering accurate and low computational cost surrogate models. It will be used a local strategy named Sequential Optimization Approach (SAO) to solve the problem.

Introdução

Injeção de água é o método tradicional mais empregado de recuperação secundária, utilizado extensivamente desde a década de 50 devido ao baixo custo associado ao uso da água, bem como à maior estabilidade do processo se comparado ao uso de gás. Uma das formas de melhorar a eficiência do varrido é através da otimização da alocação de vazões entre os poços injetores e produtores. No processo de otimização, repetidas simulações numéricas do reservatório são realizadas e, devido ao alto custo computacional de cada simulação, técnicas de aproximação são estudadas buscando solucionar este problema. Neste trabalho é utilizado uma ferramenta no ambiente MATLAB que utiliza a estratégia de otimização sequencial por aproximação (SAO). O grande desafio científico nesta área é a geração de um modelo substituto o mais preciso possível, utilizando-se o menor número possível de avaliações do modelo de alta fidelidade. Para a maioria dos problemas, a natureza da verdadeira função não é conhecida a priori, por isso não é claro qual modelo substituto será mais preciso. Aqui será utilizada a técnica de ajuste de superfícies por krigagem para construção dos modelos substitutos. Dessa forma, as avaliações da função objetivo requeridas no processo de otimização serão substituídas pelo modelo criado via krigagem a partir do ajuste de soluções obtidas com o uso do simulador IMEX (CMG, 2006) em pontos amostrais previamente considerados.

Metodologia

No problema de injeção de água, a função objetivo comumente está relacionada à produção propriamente dita ou à economia do projeto. Quando o foco está na produção de petróleo, pode-se tomar como objetivo a maximização da produção acumulada de óleo, por exemplo. Já do ponto de vista da economia do projeto, a lucratividade é normalmente escolhida como indicador, onde se pode buscar a maximização do valor presente líquido (VPL) ou de algum outro índice econômico.

Neste trabalho foi utilizado o VPL como função objetivo. As vazões nos poços em diferentes tempos ao longo da simulação são as variáveis de controle idealizadas para o problema. Para isso, o controle da vazão dos poços a cada intervalo de tempo é feito através do rateio em relação à capacidade de produção do grupo onde os poços estão ligados. Logo, temos como variáveis:

$$x_{p,t} = \frac{q_{p,t}}{Q_{prod,max}}, p \in P; \quad x_{p,t} = \alpha \frac{q_{p,t}}{Q_{prod,max}}, p \in I \quad (1)$$

onde $q_{p,t}$ é a vazão do poço p no intervalo de tempo t , $Q_{prod,max}$ é a vazão de produção total máxima permitida de fluido no poço produtor, P corresponde aos poços produtores, I aos poços injetores e α é a razão entre o óleo produzido e a água injetada:

$$\alpha = \frac{Q_{prod,max}}{Q_{inj,max}} \quad (2)$$

onde $Q_{inj,max}$ é a vazão máxima permitida de água injetada no poço injetor.

Adicionalmente, admitindo-se o funcionamento “topado” das linhas de injeção e produção, o emprego dos rateios de vazão como variáveis promove a redução de um grau de liberdade do problema para cada intervalo de tempo por cada grupo de poços. Uma vez que o grupo de poços produz ou injeta, o rateio de um dos poços torna-se dependente dos demais e pode ser obtido indiretamente.

Assim, podemos formular o problema como (Horowitz et al, 2009):

$$\text{Maximizar}_{\mathbf{x}} \quad VPL = f(x_{p,t}, \mathbf{u}) = \sum_{\tau=0}^T \left[\frac{1}{(1+d)^{\tau}} F_{\tau}(x_{p,t}, \mathbf{u}) \right] \quad (3)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad \sum_{p \in P} x_{p,t} = 1, \quad t = 1 \dots n_t \quad (4)$$

$$\sum_{p \in I} x_{p,t} = 1, \quad t = 1 \dots n_t \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P} x_{p,t} \leq \sum_{p \in I} \frac{x_{p,t}}{\alpha} \leq \frac{1}{\alpha} \sum_{p \in P} x_{p,t}, \quad t = 1 \dots n_t \quad (6)$$

$$x_{p,t}^l \leq x_{p,t} \leq x_{p,t}^u \quad (7)$$

$$x_{p,t}^d = 1 - \sum_{i=1}^{npp-1} x_{p,t}^i, \quad t = 1 \dots ncc, \quad d = \text{dependente} \quad (8)$$

$$x_{I,t}^d = 1 - \sum_{i=1}^{npi-1} x_{I,t}^i, \quad t = 1 \dots ncc, \quad d = \text{dependente} \quad (9)$$

onde $\mathbf{u}$ são as variáveis de estado; d é a taxa de desconto, F_{τ} é o fluxo de caixa, T o tempo total de operação, P e I representam o grupo de poços produtores e injetores, respectivamente, n_t o número de ciclos, $x_{p,t}^l$ e $x_{p,t}^u$ os limites inferiores e superiores de rateio entre os poços. Os valores da função objetivo (VPL) são calculados a partir de simulações numéricas usando o simulador IMEX da CMG (2006). No IMEX, após a simulação, é gerado um arquivo contendo todas as informações sobre o reservatório, de onde são coletados os dados referentes às vazões dos poços necessárias para o cálculo do VPL.

Modelo Substituto e Estratégia Local de Aproximação

Devido ao alto custo computacional da simulação de reservatórios, estratégias de aproximação que fazem uso de modelos substitutos são utilizadas.

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.

Neste trabalho foi utilizada a amostragem do hipercubo latino (LHS – *Latin Hypercube Sampling*) (Forrester et al, 2008; Giunta, 2002). Para obter uma amostra LHS, o intervalo de cada dimensão é dividido em p subintervalos de igual probabilidade. Para um domínio de projeto com n dimensões, este particionamento resulta num total de p^n subintervalos no domínio. Em seguida, p pontos são selecionadas aleatoriamente no domínio de projeto obedecendo a certas restrições, tais como: cada ponto é aleatoriamente colocado dentro de um subintervalo do domínio e para cada projeção unidimensional deste ponto só haverá um e apenas um ponto em cada subintervalo.

A técnica utilizada para a criação do modelo substituto é a krigagem (Jones et al, 1998) que pode ser escrita como:

$$f(x) = \sum_{j=1}^k \beta_j N_j(x) + Z(x) \quad (10)$$

Onde o primeiro termo é uma regressão linear dos dados com k regressores, e $Z(x)$ (o erro) é uma função aleatória (em geral segue uma distribuição gaussiana normal), com média zero, variância σ^2 , e covariância não nula. O primeiro termo é responsável pelo aspecto global ou tendência ao longo do espaço de projeto, ao passo que $Z(x)$ é responsável por criar um desvio 'localizado' em relação ao modelo global. A abordagem tradicional é chamada de krigagem ordinária em que uma função de ordem zero (constante) é empregada para o primeiro termo da Eq. (10).

O modelo substituto construído será utilizado na otimização sequencial aproximada (SAO). Essa metodologia decompõe o problema original de otimização em seqüências de subproblemas de otimização confinados dentro de uma sub-região do espaço de projeto inicial.

Um esquema de Região de Confiança (RC) é usado para atualizar as variáveis de projeto para cada subproblema (iteração do SAO). Matematicamente cada subproblema k pode ser definido como:

$$\text{Minimize } \hat{f}^k(x) \quad (11)$$

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

$$x_l \leq x_l^k \leq x \leq x_u^k \leq x_l, \quad k = 0, 1, 2, \dots, k_{\max} \quad (12)$$

$$\text{Onde } x_l^k = x_c^k - \frac{\Delta^k}{2} \quad x_u^k = x_c^k + \frac{\Delta^k}{2} \quad (13)$$

Nas equações acima, $\hat{f}^k(x)$ e $\hat{g}^k(x)$ são respectivamente a funções objetivo e a restrição baseadas no modelo substituto. Sendo x_c^k o ponto central da RC, Δ^k é o tamanho da RC e x_l^k , x_u^k são respectivamente os limites inferiores e superiores da variável de projeto na iteração k do SAO (Giunta and Eldred, 2000).

Na Tabela 1 são apresentados os principais procedimentos implementados na estratégia SAO (Silva, 2009).

Etapas SAO	Descrição
1.	Assumir o tamanho e ponto inicial da região de confiança;
2.	Gerar amostras no interior da região de confiança;
3.	Computar as funções objetivo e restrições reais nas amostras;
4.	Construir as funções substitutas (aproximadas) para as funções objetivo e restrições;
5.	Otimizar o problema usando as funções aproximadas, onde as variáveis de projeto são limitadas pelas fronteiras da sub-região;
6.	Recalcular as funções objetivo e restrições reais no ponto ótimo encontrado;
7.	Checar os critérios de convergência internos do otimizador:
7.1.	Se alcançada: o problema da iteração z está resolvido, continue com o processo.
7.2.	Caso contrário: a função aproximada não é adequada, o processo é finalizado.
8.	Manter/reduzir/aumentar a nova sub-região de acordo com o esquema da região de confiança;
9.	Checar os critérios de convergência global da estratégia SAO:
9.1.	Se alcançada: o projeto ótimo é obtido, o processo é finalizado com sucesso.
9.2.	Caso contrário: voltar para a etapa 3 do SAO.

Tabela 1: Procedimentos da estratégia SAO

Para a atualização do tamanho da RC Δ^k de cada subproblema de otimização, foi considerado o termo de aceitação da função objetivo ρ^k que controla o tamanho da RC (Giunta & Eldered, 2000), demonstra a precisão da função substituta no ponto ótimo x_*^k e pode ser calculado como:

$$\rho^k = \frac{f(x_c^k) - f(x_*^k)}{\hat{f}(x_c^k) - \hat{f}(x_*^k)}, \quad (14)$$

Para o próximo tamanho da RC a atualização segue dessa forma:

$$\begin{aligned} \Delta^{k+1} &= 0.5\Delta^k, & \text{se } \rho^k \leq 0, \\ &= 0.5\Delta^k, & \text{se } 0 < \rho^k \leq 0.25, \\ &= \Delta^k, & \text{se } 0.25 < \rho^k < 0.75 \text{ ou } \rho^k > 1.25, \\ &= 2\Delta^k, & \text{se } 0.75 \leq \rho^k \leq 1.25. \end{aligned} \quad (15)$$

A próxima iteração x_c^{k+1} é obtida de acordo com

$$\begin{aligned} x_c^{k+1} &= x_*^k, & \text{se } \rho^k > 0, \\ &= x_c^k, & \text{se } \rho^k \leq 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Descrição dos Casos Estudados

As ferramentas descritas neste trabalho são aplicadas a dois exemplos retirados da referência (Olivera, 2006).

No Exemplo 1, ilustrado na Figura 1, a permeabilidade próxima ao poço P-1 é 500mD enquanto que próxima 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, o tempo total de produção é de 16 anos.

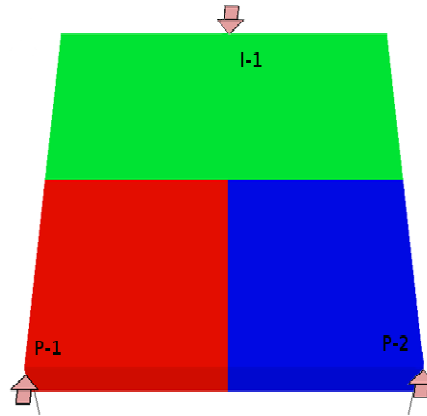


Figura 1: Regiões de permeabilidade do Caso1

A função objetivo será o VPL, como indicado na Eq. (3). A vazão máxima de produção de cada poço será de 30m³/dia, logo, as variáveis de projeto, como indicadas na Eq. (1), podem assumir valores no intervalo $0,25 \leq x_{p,t} \leq 0,75$, onde cada variável representa o rateio de vazão do poço P-1 em um ciclo de produção. Foram considerados 4, 12 e 24 ciclos de controle, como mostra a Figura 2 correspondendo a uma variável por ciclo. Com relação ao controle dos poços três condições foram consideradas: sem restrições (Caso C1), com restrição na pressão de fundo de poço (PFP) (Caso C2) e com restrição de corte de água (CA) e pressão de fundo de poço (Caso C3).

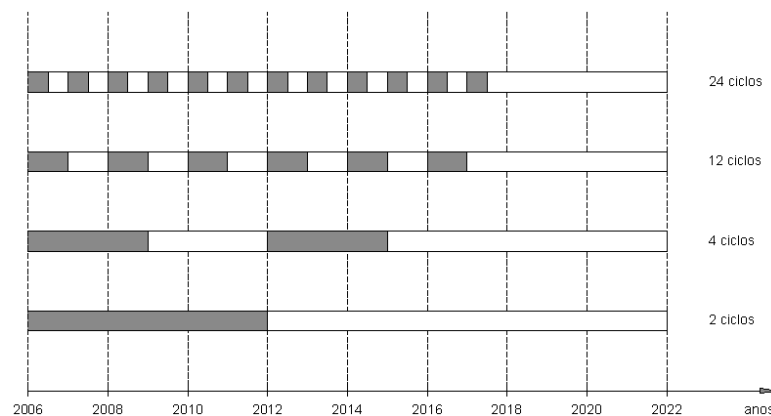


Figura 2: Ciclos de controle no período de concessão.

O Exemplo 2, ilustrado na Figura 3, compõe-se de um modelo geológico bastante próximo de um modelo de reservatório real, apesar de se tratar de um caso sintético. O modelo é constituído de 7 poços produtores restringidos em 900m³/dia cada e 5000m³/dia para o grupo dos produtores e 5 poços injetores restringidos em 1500m³/dia cada e 5750m³/dia para o grupo dos injetores. O tempo de concessão considerado nesse exemplo foi de 24 anos. O reservatório possui as seguintes características: malha de 43 x 55 x 6; Porosidade entre 16% e 28%; Permeabilidade horizontal (kh) variando de acordo com mapa de saturação, ver Figura 3; Permeabilidade vertical (kv) 30% de kh; Compressibilidade da Rocha de $2 \cdot 10^{-7} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}^{-1}$; Contatos entre Fluidos – Sem contatos WOC e GOC; Pressão de Saturação (Psat) – 101.97 kgf/cm²; Viscosidade @ Tres, Psat – 0.77 cP ; Razão Gás-Óleo de Formação (RGOF) – 78.1 m³/m³std;

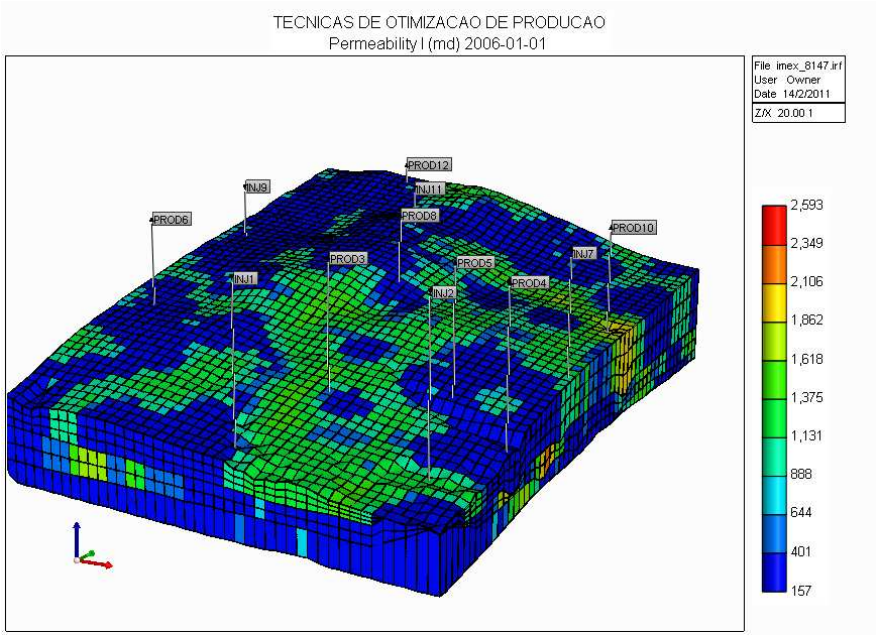


Figura 3: Regiões de permeabilidade do Caso 2

A função objetivo também é o VPL. As restrições de limite dos poços produtores são 0,0% e 18,0%, equivalentes a 0,0m³/dia e 900, 0m³/dia, e as restrições dos poços injetores são 0,0% e 25,5%, equivalentes a 0,0m³/dia e 1500, 0m³/dia. São consideradas implicitamente as restrições em igualdade que garantem o balanço de materiais e a manutenção de pressão do reservatório.

Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos do Exemplo 1 para os ciclos de controle estudados. O algoritmo de otimização local geralmente converge para o ótimo local mais próximo do ponto inicial, mostrado apenas no caso de quatro variáveis.

Número de Variáveis	Casos	Iteração SAO	VPL inicial (x 10 ⁶)	VPL final (x 10 ⁶)	Ponto inicial	Ponto final
4	Caso C1	9	1.4420	1.4925	0.25 0.25 0.25 0.25	0.3148 0.7446 0.5938 0.5836
	Caso C2	10	1.5817	1.6474	0.25 0.25 0.25 0.25	0.2877 0.6537 0.4005 0.2514
	Caso C3	6	1.6110	1.6135	0.25 0.25 0.70 0.70	0.4724 0.3326 0.5359 0.5686
12	Caso C1	7	1.4880	1.4930		
	Caso C2	16	1.6304	1.6529		
	Caso C3	2	1.6136	1.6137		
24	Caso C1	3	1.4935	1.4935		
	Caso C2	2	1.6527	1.6527		
	Caso C3	4	1.6117	1.6137		

Tabela 2: Resultado Caso 1

Para os casos de 4 e 12 variáveis o otimizador do MATLAB convergiu para a solução ótima e para o caso de 24 variáveis, apenas no Caso C3 houve aumento do VLP, no entanto notar que o número de iterações foi pequeno, indicando o ponto inicial utilizado pode corresponder a um mínimo local. Comparando esses resultados com aqueles obtidos pela plataforma DAKOTA, mostrados na

referência (Pinto, 2010), percebe-se uma redução em torno de 30 % no número de iterações ao utilizar o MATLAB.

No Exemplo 2 foi testado apenas um ciclo de controle, correspondente a 10 variáveis de projeto. O resultado, apresentado na Tabela 3, mostra um aumento do VPL em relação ao ponto inicial de 18.3 %, atingido em 22 iterações, que representa uma boa solução, alcançando o terceiro melhor resultado se comparado com a referência (Olivera, 2006) e a vantagem encontrada neste exemplo foi a significativa redução do número de avaliações da função, maior que 25% para o menor número de simulações encontrado pela referência.

Iteração SAO	Ponto inicial	Ponto final	Avaliação da função	VPL inicial (x 10 ⁶)	VPL final (x 10 ⁶)
22	0.143 0.143 0.143 0.143 0.143 0.143 0.2 0.2 0.2 0.2	0.04 0.060 0.18 0.18 0.18 0.18 0.255 0.092 0.143 0.255	485	262.093	310.031

Tabela 3: Resultado Caso 2

Estudos de mais ciclos de controle estão sendo realizados a fim de obter mais conclusões a respeito deste caso.

Conclusões

A utilização do SAO com a técnica de krigagem empregados na plataforma MATLAB se mostrou eficiente na otimização dos problemas estudados, apresentando na maioria dos testes realizados rápida convergência.

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

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, Bath-UK, 2008.

Computer Modeling Group LTD, IMEX: User's Guide. Calgary – Canadá, 2006.

Forrester, A., Sobester, A., Keane, A., *Engineering Design Via Surrogate Modelling: A Practical Guide*. Wiley, 2008.

Giunta, A.A., Use of Data Sampling, Surrogate Models, and Numerical Optimization in Engineering Design. *Paper AIAA-2002-0538 in Proceedings of the 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, 2002.

Giunta, A.A.; Eldres, M.S., Implementation of a Trust Region Model Management Strategy in the DAKOTA Optimization Toolkit. *8th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, AIAA-2000-4935. Long Beach, CA., 2000.

Horowitz, B., Afonso, S.M.B, Mendonça, C.V.P., and Willmersdorf, R.B., Rate Control Optimization Of Waterflooding Manegement, in: *CILAMCE – Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, 30th, Buzios, 2009.

Pinto, J.W.O., Afonso, S.M.B, Mendonça, Desenvolvimento de Ferramenta Integrada para Otimização de Problemas da Engenharia de Reservatório Considerando Modelos Substitutos, in: *CILAMCE – Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, 31th, Buenos Aires, 2010.

Jones, D.R., Schonlau, M. and Welch, W.J., Efficient Global Optimization of Expensive Black-Box Functions. *Journal of Global Optimization*, 13(4), 455-492, 1998.

Lophaven, S.N., Nielsen, H.B., Søndergaard, J., *DACE - A MATLAB Kriging Toolbox*. IMM Technical University of Denmark. Lyngby. Technical Report IMM-TR-2002-12, Version 2.0, 2002.

Oliveira, D.F.B. de., Técnicas de Otimização da Produção para Reservatórios de Petróleo – Abordagens sem uso de Derivadas para Alocação Dinâmica das Vazões de Produção e Injeção. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2006.

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, 2008a.

Sandia National Laboratory, Users Manual of DAKOTA, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis. Albuquerque - USA, 2008b.

Silva, M.F.da., *Estratégias de Aproximação para Otimização Estrutural*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2009.