

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



## **TÍTULO DO TRABALHO:**

USO DE META-MODELOS GERADOS POR PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO NO AJUSTE DE HISTÓRICO DE PRODUÇÃO DE CAMPOS DE PETRÓLEO

## **AUTORES:**

Alexandre de Lima, Fernanda Vaz Alves Risso, Denis José Schiozer

## **INSTITUIÇÃO:**

Departamento de Engenharia de Petróleo

Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas

*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.*

## **USO DE META-MODELOS GERADOS POR PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO NO AJUSTE DE HISTÓRICO DE PRODUÇÃO DE CAMPOS DE PETRÓLEO**

### **Abstract**

Production history matching is used to calibrate numerical models of petroleum fields in order to obtain reliable results for production prediction. Generally, the history matching process demands great computational effort due to the high number of uncertainties in the characterization of the reservoirs. The main objective of this paper is to present a different methodology to improve the efficiency of the process and to reduce the computational time, which is to use the statistical design methodology and the generation of proxy models (faster simulation models that can substitute the simulator). The application is a synthetic reservoir with known characteristics which was intentionally used to validate the methodology. The history matching is represented by the minimization of an objective function, which represents the difference between observed and simulated water production. The reservoir is divided in regions with similar geologic properties, except absolute permeability. The permeabilities of each region were used as attributes to be modified in the matching process. The process is initiated with a coarse search to eliminate undesired solutions and, after a refined search is performed to find the best solutions. The methodology consists of: (1) characterization of the reservoir and uncertain attributes; (2) definition of the uncertainty range of each attributes; (3) definition of the type of the statistical design; (4) simulations of necessary models; (5) calculation of the objective functions; (6) generation of the proxy-models; (7) calculation of the error from the proxy-models; (8) optimization process to find the acceptable solutions and (9) verification of the quality of the history matching. The results were very satisfactory presenting good matches for the case studied and reduction in the computational time, demonstrating that the methodology can be tested in more complex reservoirs and with industrial purposes.

### **Introdução**

A necessidade do mercado em reduzir custos para viabilizar a exploração do petróleo em águas profundas e obter respostas cada vez mais rápidas nos processos de análise de decisão são preocupações constantes da indústria de petróleo. Assim, torna-se necessário utilizar ferramentas alternativas para substituir ou melhorar os métodos tradicionais, que muitas vezes demandam muitos recursos, como é o caso de estudos de reservatórios através de simuladores numéricos de campos de petróleo. Esse artigo tem foco na linha de pesquisa de Ajuste de Histórico de Produção, que tem como objetivo calibrar modelos numéricos de campos de petróleo, para que os resultados obtidos sejam coerentes com o histórico de produção existente e que esses modelos sejam confiáveis para prever a produção.

Geralmente, o ajuste de histórico necessita de grande esforço computacional, pois é um processo complicado e trabalhoso. Portanto, com o objetivo de reduzir o tempo de simulação e o esforço computacional, foram utilizadas ferramentas como: o planejamento estatístico, meta-modelos e um método de otimização de busca direta (MOT), com a finalidade de comparar os resultados e a eficiência do processo de ajuste.

### **Metodologia**

Nesse artigo foi proposta a utilização de meta-modelos gerados através de planejamento estatístico com o intuito de obter um eficaz ajuste de histórico, além de mostrar que essa metodologia de ajuste estudada poderá ser utilizada em conjunto com uma metodologia tradicional, no caso o MOT [Módulo de Otimização – método de otimização de busca direta com objetivo de encontrar, para um dado

conjunto finito de propriedades de um reservatório e seu respectivo intervalo de variação, certa combinação de valores que possibilitem a realização de um melhor ajuste de histórico de produção – Leitão (1997)]. Portanto, o trabalho foi dividido em 3 casos como mostra o fluxograma apresentado na Figura 1;

- CASO 1 - Consiste na metodologia de ajuste que tem como os principais tópicos (1) caracterização do reservatório e dos atributos incertos; (2) definição da faixa de variação de cada atributo; (3) definição do tipo de planejamento estatístico; (4) simulação dos modelos representativos; (5) cálculo da função-objetivo; (6) geração dos meta-modelos; (7) cálculo do erro através do meta-modelos; (8) otimização para encontrar soluções aceitáveis; (9) verificação da qualidade do ajuste de histórico. Os passos podem ser repetidos para diferentes funções-objetivo ou se a solução não é aceita conforme a qualidade desejada para o ajuste
- CASO 2 – Consiste em utilizar parte da metodologia de ajuste desenvolvida (CASO 1) até encontrar o primeiro mínimo obtido através da minimização do meta-modelo (polinômio) através do MATLAB, e introduzir esse valor como entrada para o Módulo de Otimização (MOT), de forma a configurar um caso híbrido.
- CASO 3 – Consiste em utilizar somente o MOT (Módulo de Otimização) para realizar o Ajuste de Historio, de forma a configurar um caso tradicional de Ajuste, que poderá ser melhor compreendido através de Leitão (1997).

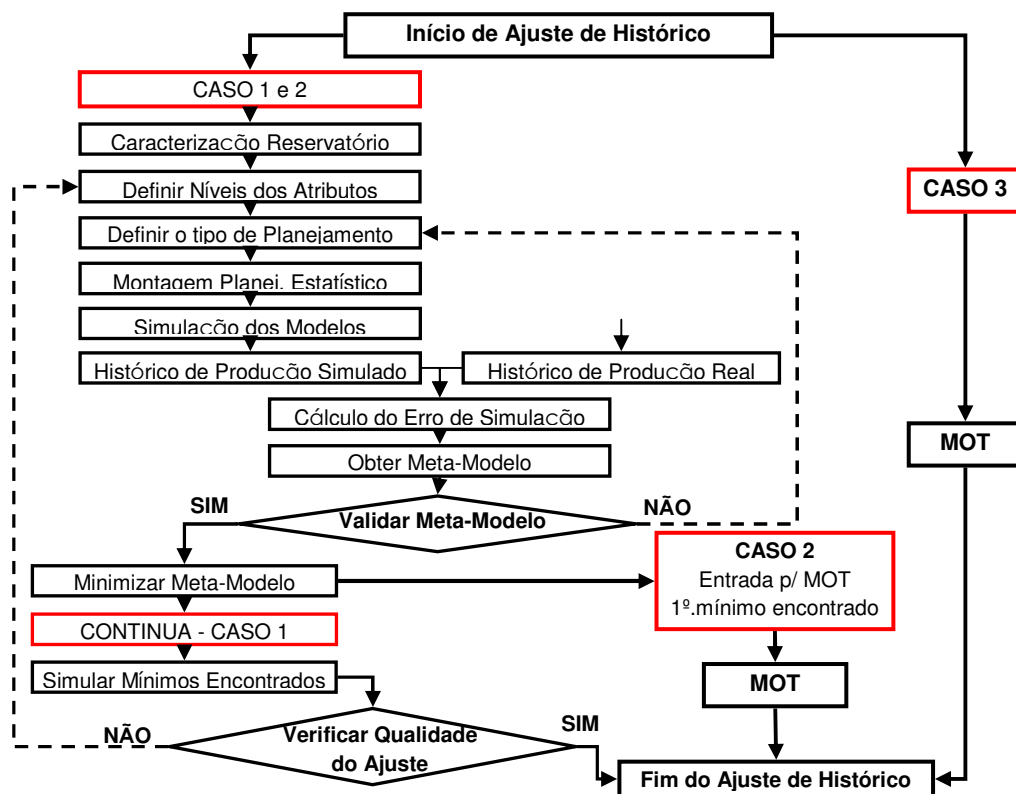


Figura 1 - Fluxograma da metodologia

A qualidade do Ajuste de Histórico está relacionada através de um coeficiente de qualidade ( $C_{quali}$ ), definido através da equação 1, que quando próximo do coeficiente ideal ( $C_{quali}=0$ ) sugerem que o Histórico Simulado está próximo do Histórico Real, o que configura um ajuste satisfatório, conforme pode se observar na Figura 2. Porém, quando esses valores são elevados, como demonstrado na Figura 3, ( $C_{quali}=4,88$ ) , verifica-se que o valor do Histórico Simulado (mínimo) está muito distante do Histórico Real, o que demonstra um ajuste insatisfatório. Sabe-se que foi adicionado ao Histórico Real

um erro aleatório aos dados do Histórico Real (Sem Ruído) para representar dados mais próximos da realidade.

$$C_{quali} = \frac{\sum ABS(P_N \cdot R_{(t)} - P_N \cdot S_{(t)})}{\text{Número\_Pontos}} \quad (1)$$

$P_N \cdot R$  = Histórico Real do poço N referente ao tempo (t)

$P_N \cdot S$  = Histórico Simulado do poço N referente ao tempo (t)

ABS – módulo

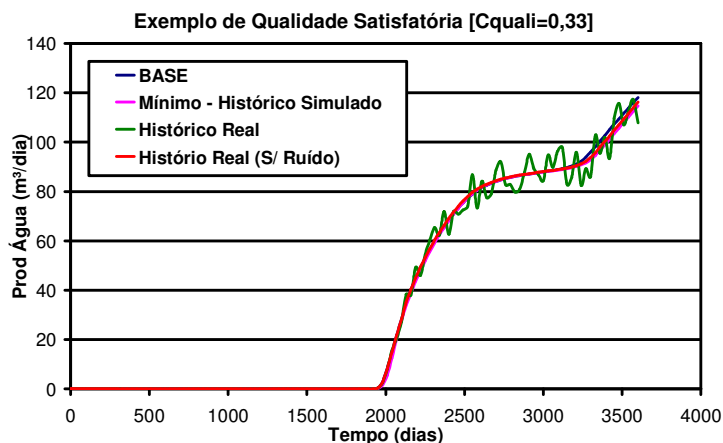


Figura 2 – Gráfico com coeficiente de qualidade satisfatório ( $C_{quali}=0,33$ )

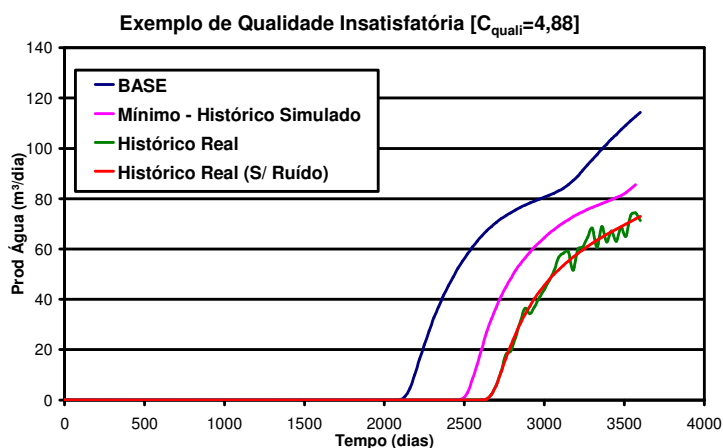


Figura 3 - Gráfico com coeficiente de qualidade insatisfatório ( $C_{quali}=4,88$ )

## Aplicação

A metodologia será aplicada a um reservatório de hidrocarbonetos dividido em oito regiões de fluxo entre produtores e injetores. Os atributos foram definidos como as permeabilidades efetivas na direção horizontal para as oito regiões do reservatório, como: Kx1, Kx2, Kx3, Kx4, Kx5, Kx6, Kx7 e Kx8. O reservatório possui oito poços, sendo seis poços produtores e dois poços injetores, como pode observar na Figura 4.

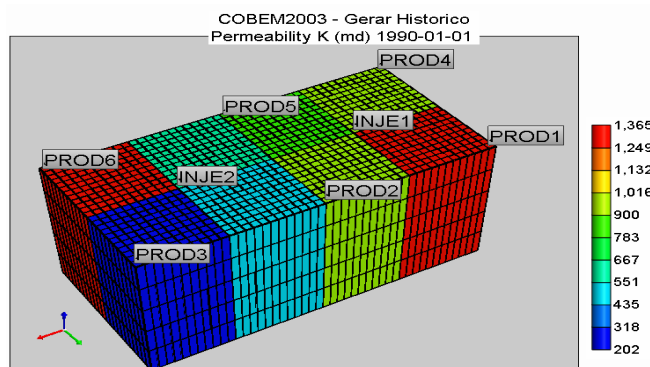


Figura 4. Reservatório de hidrocarbonetos que contém seis poços produtores e dois injetores.

## Resultados e Discussão

### Caso 1 - Parte A (Região Macro)

A variação dos níveis dos atributos foi definida entre uma faixa de 1000 a 7500mD, a partir disso, realiza-se uma distribuição triangular em 3 níveis para esses valores, como demonstrado na Tabela 1. Foi utilizado planejamento Box-Behnken, para 8 atributos, que consiste em uma matriz que contém 136 modelos, portanto foram necessárias 136 simulações para encontrar os erros referentes a cada modelo e gerar o meta-modelo para a função-objetivo desejada (produção de água).

O meta-modelo foi validado tanto através da Análise de Variância, quanto pelo Método Gráfico, que compara graficamente o erro simulado (obtido da comparação entre o Histórico Real e o Simulado) e o erro predito (obtido através do meta-modelo). Teoricamente, se a correlação for ideal, todos os pontos estão localizados em uma reta de ângulo de inclinação igual a 45° (coeficiente angular unitário). Em cada gráfico, foi calculado o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), quadrado do coeficiente de correlação de Pearson. Para uma correlação perfeita o valor do coeficiente de determinação deve ser igual a 1 ( $R^2=1$ ). Neste caso, obteve-se um  $R^2=0,98$ , o que justificou a validação.

O resultado apresentado na Tabela 1 é referente ao mínimo encontrado após a utilização do programa desenvolvido em MATLAB, realizou-se uma busca entre os valores codificados compreendidos entre -1 e 1. Ao simularmos o mínimo encontrado (Tabela 1), foi possível obter o histórico simulado, que ao ser comparado com o histórico real, foi possível verificar a qualidade do ajuste através do  $C_{quali}$ .

Tabela 1 – Definição dos valores para os níveis de atributos, resultados do mínimo encontrado e do coeficiente de qualidade ( $C_{quali}$ )

| NÍVEIS DOS ATRIBUTOS - BOX |      |      |      | Mínimo Macro (encontrado) | Poços  | $C_{quali}$ |
|----------------------------|------|------|------|---------------------------|--------|-------------|
| Valores codificados        | -1   | 0    | 1    |                           | Poço 1 | 0,87        |
| Kx1 (mD)                   | 1000 | 4250 | 7500 | 6416,7                    | Poço 2 | 3,48        |
| Kx2 (mD)                   | 1000 | 4250 | 7500 | 5405,6                    | Poço 3 | 1,23        |
| Kx3 (mD)                   | 1000 | 4250 | 7500 | 4683,3                    | Poço 4 | 3,67        |
| Kx4 (mD)                   | 1000 | 4250 | 7500 | 1000                      | Poço 5 | 3,58        |
| Kx5 (mD)                   | 1000 | 4250 | 7500 | 5405,6                    | Poço 6 | 1,69        |
| Kx6 (mD)                   | 1000 | 4250 | 7500 | 3238,9                    | Média  | 2,42        |
| Kx7 (mD)                   | 1000 | 4250 | 7500 | 2805,6                    |        |             |
| Kx8 (mD)                   | 1000 | 4250 | 7500 | 7002,5                    |        |             |

Em seguida, definiu-se um novo planejamento com o intuito de refinar o processo e obter uma melhor confiabilidade do ajuste de histórico. Esse processo é realizado, pois o meta-modelo não se comporta de maneira precisa na região do mínimo encontrado; portanto é necessário definir uma nova região de estudo (Região Micro) para se obter uma resposta mais precisa.

### Caso 1 - Parte B (Região Micro)

Os níveis dos atributos para o planejamento de uma região micro foram estabelecidos com base no mínimo da região macro. Portanto, os níveis foram definidos conforme os valores mostrados na Tabela 2, a partir da equação (2).

$$Kx_- = Kx_m n - 0,6 \times Kx_m n$$

$$Kx_+ = Kx_m n + 0,6 \times Kx_m n \quad (2)$$

$Kx_-$  é o limite inferior da faixa de níveis;

$Kx_+$  é o limite superior da faixa de níveis;

$Kx_m n$  é valor de permeabilidade encontrado para o mínimo, os valores de n podem ser (1,2,3,4,5,6,7 e 8);

**Tabela 2 - Definição dos valores para os níveis de atributos, resultados do mínimo encontrado e do coeficiente de qualidade ( $C_{quali}$ )**

| NÍVEIS DOS ATRIBUTOS - BOX |        |      |      | Mínimo Micro (encontrado) | Poços        | $C_{quali}$ |
|----------------------------|--------|------|------|---------------------------|--------------|-------------|
| Valores codificados        | -1     | 0    | 1    |                           | Poço 1       | 0,29        |
| Kx1 (mD)                   | 6704,8 | 5515 | 7500 | 6704,8                    | Poço 2       | 2,75        |
| Kx2 (mD)                   | 5365,3 | 5237 | 7500 | 5365,3                    | Poço 3       | 1,22        |
| Kx3 (mD)                   | 4703,9 | 4683 | 6790 | 4703,9                    | Poço 4       | 1,76        |
| Kx4 (mD)                   | 1450   | 1225 | 1450 | 1450                      | Poço 5       | 0,70        |
| Kx5 (mD)                   | 5259,5 | 5237 | 7500 | 5259,5                    | Poço 6       | 2,81        |
| Kx6 (mD)                   | 3831,8 | 3239 | 4696 | 3831,8                    | <b>Média</b> | <b>1,59</b> |
| Kx7 (mD)                   | 4068,1 | 2806 | 4068 | 4068,1                    |              |             |
| Kx8 (mD)                   | 7372,6 | 5676 | 7500 | 7372,6                    |              |             |

Foi realizado um novo planejamento Box-Behnken para a Parte B – Região Micro, porém houveram mudanças somente entre os valores dos níveis de variação dos atributos. A partir do mesmo procedimento para a Parte A – Região Macro foi gerado um novo meta-modelo para a produção de água para a região micro, e validada estatisticamente através dos dois métodos já utilizados anteriormente. Pode-se verificar que para a região micro o meta-modelo apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2=0,94$ ), validando a superfície devido à proximidade coeficiente ideal ( $R^2=1$ ). A partir da realização de um segundo planejamento, conseqüentemente a obtenção de um novo meta-modelo, foi possível melhorar a qualidade do ajuste. Isso pode ser verificado através da comparação entre os valores dos coeficientes de qualidade ( $C_{quali}$ ) apresentados na Tabela 2 para a região macro e na Tabela 3 para região micro. Pode se observar que os valores dos coeficientes de qualidade ( $C_{quali}$ ) foram menores para a região micro em todos os poços em relação à região macro, exceto o  $C_{quali}$  do poço 6 que aumentou.

### Caso 2

O caso 2 foi construído com base no mínimo (Tabela 1) encontrado pela metodologia desenvolvida no artigo para região macro (assim como pode ser visto através do organograma – Figura 1), então foram definidos os limites superiores e inferiores, através da equação (2), do intervalo em

que o MOT buscará o mínimo, como mostra a Tabela 3. Esse intervalo foi discretizado em 5 partes (máximo permitido pelo MOT para 8 atributos).

**Tabela 3 – Resultados que mostram a faixa de busca (limite inferior e limite superior), ponto de partida (mínimo encontrado através da S.R.), ponto de chegada (mínimo final encontrado através do MOT) e qualidade do ajuste ( $C_{quali}$ )**

| Caso 2   | Limite Inferior | Limite Superior | Ponto Partida | Ponto Chegada | Caso 2 (Mínimo encontrado) | $C_{quali}$ |
|----------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|----------------------------|-------------|
| Kx1 (mD) | 2566            | 7500            | 6416,7        | 6677,7        | Poço 1                     | 0,35        |
| Kx2 (mD) | 2162            | 7500            | 5405,6        | 5720,7        | Poço 2                     | 1,37        |
| Kx3 (mD) | 1873            | 6800            | 4683,3        | 3748,7        | Poço 3                     | 0,68        |
| Kx4 (mD) | 1000            | 1600            | 1000          | 1300,0        | Poço 4                     | 0,33        |
| Kx5 (mD) | 2162            | 7500            | 5405,6        | 4831,0        | Poço 5                     | 0,38        |
| Kx6 (mD) | 1295            | 5182            | 3238,9        | 3886,3        | Poço 6                     | 1,12        |
| Kx7 (mD) | 1122            | 4488            | 2805,6        | 3937,0        | <b>Média</b>               | 0,70        |
| Kx8 (mD) | 2801            | 7500            | 7002,5        | 7500,0        |                            |             |

O Módulo de Otimização foi executado de forma a realizar 79 simulações para o Caso 2, saindo de um ponto de partida (ponto de mínimo referente à região Macro), e chegando ao ponto de mínimo do Caso 2 (ponto de chegada). Realizou-se a simulação do ponto de chegada do Caso 2, e a partir da equação (1), encontraram-se os coeficientes de proximidade, que mostram que estão próximos o histórico simulado do histórico real ( $C_{quali\_ideal} = 0$ ), nota-se que no total foram utilizadas 215 simulações, todas essas informações podem ser observadas através da Tabela 3.

### Caso 3

O Caso 3 tem como objetivo o uso do MOT (Módulo de Otimização), porém esse programa apresenta certas limitações para um reservatório com 8 atributos (possível somente uma discretização grosseira). Portanto, para realizar o ajuste foram utilizadas 3 malhas, no qual a faixa de variação dos atributos foi reduzida com base no ponto chegada da malha anterior. Por exemplo, a faixa dos atributos da malha 2 é definida a partir do ponto de chegada referente a malha 1, pela equação (3)

$$\begin{aligned}
 Kx_- &= Kx_m - 0,6 \times Kx_m \\
 Kx_+ &= Kx_m + 0,6 \times Kx_m \\
 Kx_m &\text{ é o ponto de chegada da malha anterior.}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$Kx_-$  é o limite inferior da faixa de níveis;  
 $Kx_+$  é o limite superior da faixa de níveis;

A malha 1 foi construída com base no problema padrão, com os limites superiores (7500) e inferiores (1000) definidos para cada um dos 8 atributos. Esse intervalo foi discretizado em 5 partes (máximo permitido pelo MOT para 8 atributos). Na malha 1, o MOT executou 111 simulações. A malha 2 (mais refinada) foi construída com base na malha 1, e seus limites superiores e inferiores foram definidos através da equação (3), nessa etapa o MOT executou 64 simulações. Enquanto que na malha 3, o MOT executou mais 79 simulações, e chegou a um ponto de mínimo julgado como satisfatório, pois apresentou um Coeficiente de Qualidade médio referente aos 6 poços igual a 1,16. ( $C_{quali\_médio} = 1,16$ )

O ajuste através do MOT foi finalizado utilizando-se três malhas, de forma apresentar um coeficiente de proximidade médio de 1,16 (malha 3) e um total de 254 simulações. O que pode se

observar é que entre a Malha 1 e Malha 2, praticamente ocorreu o mesmo resultado, o que demonstra que é impossível ter certeza do mínimo encontrado, mesmo executando o MOT diversas vezes.

Ao comparar os 3 casos, temos que o melhor desempenho foi obtido através do Caso 2 (Metodologia desenvolvida + MOT), pois apresentou o menor coeficiente de proximidade médio ( $C_{prox\_médio}=0,7$ ) e utilizou-se do menor número de simulações em relação aos outros métodos (Tabela 3). O Caso 1 apresenta uma desvantagem, ou seja, não se tem a certeza se o meta-modelo representa realmente o simulador, porém é mais flexível para discretizar. O Caso 3 apresenta outra desvantagem, pois não é possível ter certeza quantas simulações serão necessárias para encontrar o mínimo, portanto pode tanto obter um bom ajuste com poucas simulações ou com muitas simulações.

**Tabela 4 - Coeficiente de proximidade ( $C_{prox}$ ) comparando o Histórico Real com o Histórico Simulado.**

|        | Número de Simulações | $C_{quali\_medio}$ |
|--------|----------------------|--------------------|
| CASO 1 | 272                  | 1,59               |
| CASO 2 | 215                  | 0,70               |
| CASO 3 | 254                  | 1,16               |

## **Conclusões**

Após o uso de metamodelos, obtidos através do planejamento estatístico, com a finalidade de reduzir o tempo computacional e também de validar a metodologia apresentada, conclui-se que o método se demonstrou eficaz para a realização do Ajuste de Histórico. Acredita-se que exista um ganho com a ampliação da complexidade do problema (aumento do número de atributos e do tempo de simulação), pois com 8 atributos foi quase impossível a utilização do MOT, devido a várias limitações, como ocorreu nesse artigo.

Nesse projeto foram comparadas três maneiras para realizar um ajuste de histórico, pode-se concluir que o CASO 2, para um reservatório de 8 atributos, foi a melhor opção, pois foi o que mostrou a melhor relação entre número de simulações e precisão. Porém, foi possível realizar o Ajuste de Histórico através de todos os métodos, cada um apresentando seus prós e contras.

## **Agradecimentos**

Os autores agradecem o apoio financeiro da Petrobras, FAPESP, FINEP e ANP.

## **Referências Bibliográficas**

- Aziz, K.; Settari, A.; **“Petroleum Reservoir Simulation”**, 2nd ed., Applied Science Publishers LTD. Essex. 1983.
- BOX, G.E.P., BEHNKEN, D.W., **“Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables”**. Technometrics 2, 455-475. 1960.
- BOX, G.E.P., HUNTER, W.G., HUNTER, J.S. **“Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis, and model building”**. New York: Wiley, 1978.
- Bruns, R. E.; Scarminio, I. S.; Neto, B. B. Como Fazer experimentos. Editora Unicamp. Campinas. 2003.
- CAPRO I – **“Curso de Atualização em Produção”** – Reservatórios, vol. I & II, Petrobrás – Petróleo Brasileiro S.A. . Rio de Janeiro. 1970.
- Formagio, G. F., Schiozer, D.J.: **“Uso do Planejamento Experimental no Processo de Ajuste de Histórico de Produção de Campos de Petróleo”**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Petróleo, Unicamp, 2005. Projeto de Graduação.
- Heluey, V. J. **“Aplicação de Correlações no Estudo de Análise de Risco em Projetos de Engenharia de Reservatórios de Petróleo”**. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. UNICAMP. 2003. Dissertação (Graduação).



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

- Leitão, H.C.; Schiozer, D.J.. **“Ajuste de Histórico Automatizado Através de Otimização Multivariada e Paralelização Externa”**. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Petróleo, Unicamp, 1997. Dissertação (Mestrado).
- Madeira, M. G. **“Comparação de Técnicas de Análise de Risco Aplicadas ao Desenvolvimento de Campos de Petróleo”**. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. UNICAMP. 2005. Dissertação (Mestrado).
- Risso, V.F., Schiozer, D.J.. **“Ajuste de Histórico Utilizando Planejamento Estatístico e Combinação de Dados de Produção, Pressão e Mapas de Saturação”**. Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Petróleo, Unicamp, 2007. Dissertação (Doutorado).