



# 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

## APLICAÇÃO DE METODOLOGIA PARA A AUTOMATIZAÇÃO DE AJUSTE DE HISTÓRICO

Célio Maschio e Denis José Schiozer

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica  
Departamento de Engenharia de Petróleo, Caixa Postal 6122  
13.083-970, Campinas, SP  
celio@dep.fem.unicamp.br

**Resumo** – Neste trabalho, descreve-se a aplicação de uma metodologia para a automatização parcial do ajuste de histórico usando simulações numéricas de reservatórios, através da computação paralela. É dado enfoque à importância da escolha adequada dos parâmetros a serem modificados para se reduzir a função-objetivo, que representa a qualidade do ajuste, bem como ao efeito da composição de duas funções-objetivo na qualidade do ajuste e a eficiência do processo. A metodologia é aplicada a um caso real, adotando-se diferentes números de parâmetros com diferentes níveis de discretização.

Palavras-Chave: simulação de reservatórios, ajuste de histórico, computação paralela

**Abstract** – This work describes the application of a methodology for partial automation of history matching using reservoir simulation through parallel computing. The main objective of this work is to show an adequate selection of parameters to be modified in order to reduce objective function that represents the matching quality, as well as the composition of two objective functions, taking in account the efficiency and quality of matching. The methodology is applied to a real field, adopting different number of parameters and different discretization levels.

Keywords: reservoir simulation, history matching, parallel computing

## 1. Introdução

A etapa de ajuste de histórico é uma das mais importantes no estudo de um campo de petróleo. Ela é imprescindível porque a quantidade de informações disponíveis quase nunca permite uma caracterização perfeita do reservatório. Desta forma, torna-se necessária a calibração do modelo construído a partir das informações disponíveis, para que o mesmo possa ser utilizado de forma mais confiável na previsão de comportamento do campo em estudo. Na grande parte das aplicações práticas, o ajuste de histórico ainda é feito de forma manual, por um processo de tentativa e erro, o qual é bastante exaustivo e demanda muito tempo do profissional envolvido. A automatização do processo ainda continua sendo alvo de várias pesquisas. Há, também, um consenso sobre a dificuldade de se conseguir um processo completamente automático. O que se busca, no desenvolvimento de metodologias, é a redução de tarefas manuais do engenheiro, mas a experiência e a tomada de decisões ainda continuará sendo fatores importantes no processo. A escolha da função-objetivo a minimizar, a seleção dos parâmetros, a definição da melhor seqüência das funções-objetivo a serem minimizadas, dentre outras, ainda são pontos indefinidos que merecem melhor estudo e compreensão.

Basicamente, há duas categorias de algoritmos de ajuste de histórico. A primeira delas é baseada no método de gradientes, que consiste no cálculo das derivadas da função-objetivo. A principal limitação desse método é o número reduzido de variáveis possíveis de serem estudadas, pois demanda alto custo computacional, em termos de tempo de CPU (Ravalec-Dupin, 2002). Outra limitação deste método é relativa ao comportamento da função-objetivo a ser minimizada. Para funções muito irregulares, com variações abruptas, o método de gradientes apresenta problemas de convergência (Schiozer, 1999). Portanto, a aplicação desse método fica restrita a casos mais simples, não atendendo de forma efetiva às aplicações reais, que geralmente são mais complexas e envolvem uma grande quantidade de parâmetros. A outra categoria do processo de ajuste de histórico são os métodos discretos (ou de busca direta), que são mais robustos e sempre garantem a convergência para uma solução.

## 2. Metodologia

A metodologia de ajuste de histórico descrita neste trabalho compreende a integração de três ferramentas: MPS (Módulo de Paralelização de Simulações), ASAHP (Análise de Sensibilidade para Ajuste de Histórico de Produção) e MOT (Módulo de Otimização).

### 2.1. Análise de Sensibilidade

A escolha das variáveis do modelo que devem ser alteradas para se obter o ajuste de histórico é uma das etapas mais importantes do processo. A qualidade do ajuste, bem como o esforço computacional requerido, depende muito desta escolha. Um processo de otimização visando o ajuste de histórico pode ser utilizado com qualquer parâmetro, porém a inclusão de variáveis que exercem pouca influência sobre o modelo, além de aumentar desnecessariamente o número de simulações, prejudica a otimização em si, ou seja, desacelera a velocidade de convergência.

Desta forma, é recomendável uma análise de sensibilidade preliminar, para se verificar a influência de determinados parâmetros e possibilitar a escolha daqueles que realmente influenciam no processo.

A criação de índices de sensibilidade tem como objetivo principal facilitar a análise de seleção de parâmetros, pois, em geral, há dificuldade na comparação de curvas reais e simuladas e um grande número de parâmetros para serem analisados. A análise de sensibilidade é uma etapa muito importante para a delimitação do problema. Conforme recomendam Leitão e Schiozer (1998), quanto maior o tempo investido com análises de sensibilidade, menor a probabilidade de insucessos durante a etapa de otimização. O número de ciclos no processo tende a aumentar caso a ferramenta de otimização seja usada de forma mais “exploratória”.

### 2.2. Método de Otimização

O método de otimização descrito e utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Leitão e Schiozer (1999). Trata-se de um método de discretização do espaço de soluções, formado pela combinação dos parâmetros envolvidos no processo de ajuste. Na Figura 1(a) mostra-se, esquematicamente, o procedimento relativo a este método. Para efeito de simplificação, é mostrada a combinação de dois parâmetros (ou propriedades),  $P_1$  e  $P_2$ . Cada ponto mostrado na malha representa os valores da função-objetivo a ser minimizada, resultantes da discretização e combinação de  $P_1$  e  $P_2$ . O número de pontos depende do nível de refinamento dos parâmetros, neste caso  $P_1$  e  $P_2$ . O procedimento compreende:

- 1) Escolhe-se, aleatoriamente, um ponto no espaço discretizado (Ponto 1);
- 2) Faz-se uma pesquisa com os pontos vizinhos do Ponto 1 (primeira busca exploratória, com os pontos “2”) e escolhe-se aquele de menor função-objetivo;
- 3) Caminha-se na direção do ponto encontrado na Etapa 2, até encontrar um ponto de menor da função-objetivo (primeira busca linear);
- 4) Realiza-se a segunda busca exploratória, com os Pontos “4”, da mesma forma que na Etapa 2.

Seguindo este procedimento, alternância entre busca linear e busca exploratória, chega-se ao ponto de mínimo (Ponto 5), localizado na zona mais escura da Figura 1(a).

A grande vantagem deste método é que ele não apresenta problemas de convergência. Outra vantagem é que o método pode ser aplicado para funções complexas, com a presença de variações abruptas. Para estes casos, é possível iniciar vários processos ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ , Figura 1-b) ao mesmo tempo, podendo-se encontrar mais de uma solução (mínimos locais). A partir dessas soluções iniciais, pode-se refinar o tratamento para a busca de uma melhor solução

(mínimo global). Outra vantagem deste método é que a indicação de tolerância na função-objetivo não é necessária, sendo que a discretização dos parâmetros é a responsável pelo nível de precisão desejado. Nessa área de atuação, o sentimento de discretização dos parâmetros que representam propriedades de rocha e fluidos é mais fácil de ser entendido do que a tolerância no processo, que muitas vezes representa uma função complexa composta por diferenças entre curvas. Pode-se trabalhar também com um processo iterativo onde a discretização dos parâmetros aumenta à medida que a região de mínimo local ou global é atingida.

Vale destacar que a metodologia descrita não é totalmente automática. A experiência das pessoas envolvidas no processo ainda comanda as principais ações. Uma vez concluído um determinado processo de ajuste, deve-se verificar se o resultado obtido atende aos objetivos do estudo. Em caso negativo, as variáveis do problema devem ser revistas, excluindo-se aquelas de pequena sensibilidade ou incluindo-se novos parâmetros no processo. A grande vantagem da metodologia é a economia de tempo em tarefas manuais, agilizando as etapas mais repetitivas do ajuste.

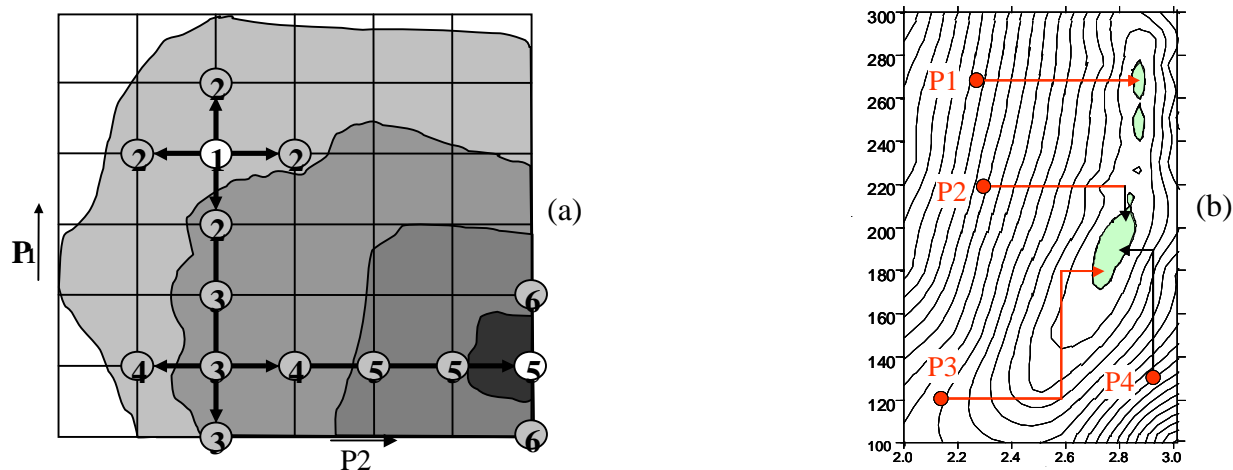


Figura 1. Representação do método discreto de otimização (a), mínimos locais (b) (Schiozer, 1999)

### 2.3. Computação paralela e MPS

Uma das ferramentas importantes envolvidas na metodologia discutida neste trabalho é a computação paralela, neste caso o paralelismo externo. O paralelismo externo implica na distribuição de tarefas em uma rede de computadores (PC ou estações de trabalho). A vantagem é que se pode usar qualquer simulador comercial sem necessidade de alteração do código fonte. Na paralelização externa, cada simulação é realizada em diferentes processadores, que podem pertencer a uma mesma máquina ou a máquinas diferentes. O software mais comumente usado é o PVM (Parallel Virtual Machine). A paralelização externa de simulações é um recurso poderoso na área de Engenharia de Petróleo, onde grandes esforços computacionais são requeridos como, por exemplo, ajuste de histórico e análise de projetos sob incertezas, que normalmente exigem um grande número de simulações. Dependendo do número e velocidade das máquinas disponíveis, o tempo de execução de um conjunto de simulações pode ser reduzido dramaticamente, permitindo a análise de casos mais complexos e análises mais detalhadas, com maior número de parâmetros.

Na metodologia utilizada neste trabalho, utiliza-se a paralelização externa através do *software* MPS (Módulo de Paralelização de Simulações), desenvolvido por Schiozer e Sousa (1997). O desenvolvimento do MPS foi motivado pelo fato de que, na grande parte dos casos, as simulações numéricas de reservatórios requerem um tempo muito maior do que o tempo de comunicação entre as máquinas de uma rede, e também pelo fato de que as simulações são independentes. Dentre outras atribuições, o MPS é responsável pela distribuição eficiente das simulações na rede, através do cálculo das velocidades relativas das máquinas, da avaliação da capacidade e das vantagens de cada máquina realizar mais de uma simulação ao mesmo tempo, dividindo-a em várias células de execução (quando essa divisão trazer benefícios), cálculo das cargas, número de licenças disponíveis para um determinado simulador, etc.

## 3. Aplicação

A metodologia descrita neste trabalho foi aplicada a um caso real (um campo marítimo, localizado na Bacia de Campos). O campo é drenado por 39 poços produtores e a manutenção da pressão é feita através de 11 injetores de água. O reservatório é discretizado em uma malha cartesiana de 36 x 19 x 5, totalizando 3420 blocos, dos quais, 1383 são blocos ativos. O contato água-óleo coincide com o limite superior da Camada 5 e os injetores de água estão completados nos blocos desta camada. Os produtores estão completados nos blocos da Camada 3 e/ou Camada 4.

### 3.1. Análise de sensibilidade do caso estudado

Na ferramenta usada nesse trabalho, utilizam-se índices cujos valores representam a influência da propriedade no ajuste e o sinal é uma indicação da direção do ajuste. O sinal negativo indica que a modificação afastou a resposta do caso base em relação ao histórico e o sinal positivo indica uma aproximação do caso base em relação ao histórico.

O reservatório analisado apresentava um grande desajuste na vazão de água. Portanto, esta foi a função-objetivo escolhida para a análise de sensibilidade. Foram escolhidos seis parâmetros e diversos multiplicadores, conforme mostrado na Tabela 1. Nota-se que alguns parâmetros exercem grande influência sobre o modelo base. Dentre eles, o que exerce a maior influência é a permeabilidade relativa à água. A porosidade, permeabilidade horizontal e vertical também exercem uma determinada influência.

Tabela 1. Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade

Parâmetro	Multiplicadores				Índices de Sensibilidade			
Permeabilidade horizontal (PERMI)	0,75	1,75	3,0		-0,266	-0,344	<b>0,550</b>	
Permeabilidade vertical (PERMK)	0,1	0,2	0,8	1,4	<b>-0,438</b>	0,351	0,08	-0,058
Porosidade (POR)	0,75	1,25	1,75	2,5	-0,576	0,297	0,494	<b>0,649</b>
Compressibilidade da rocha (CPOR)	0,08	0,2	1,5		-0,077	0,108	0,075	
Permeabilidade relativa ao gás (KRG)*	0,5	1,5	2,5		0,054	0,047	-0,011	
Permeabilidade relativa à água (KRW)*	0,2	0,5	1,5		<b>1,000</b>	0,665	-0,678	

\* O multiplicador, neste caso, desloca a curva para cima ou para baixo, mantendo os extremos no eixo da saturação.

### 3.2. Ajuste

Em decorrência da análise de sensibilidade, KRW, PERMK, PERMI e POR foram os parâmetros selecionados para o processo de ajuste. Escolhidos os parâmetros, foram feitas combinações relativas ao número e ao nível de discretização dos mesmos, sendo avaliado o impacto dessas combinações na qualidade do ajuste, levando-se em conta a redução (percentual) na função-objetivo e o esforço computacional, em termos do número de simulações.

### 3.3. Influência do número de parâmetros e do nível de discretização

Na Figura 2, mostra-se o resultado do ajuste da vazão de água (a) e da pressão média no reservatório (b) para a primeira execução (E1 - Tabela 2) do módulo de otimização. Primeiramente, pode-se notar que há um desajuste considerável na vazão de água. Com apenas 2 parâmetros (KRW e PERMK) e usando 4 intervalos para cada um, ou seja, 4 níveis de discretização (2P-4N), houve uma redução considerável na função-objetivo (79,8 %), produzindo um bom ajuste nas curvas de vazão de água, e também na curva de pressão média, com apenas 6 simulações. O aumento do número de intervalos de 4 para 8 para KRW e PERMK elevou o número de simulações de 6 para 21, porém o resultado do ajuste foi semelhante, reduzindo apenas um pouco mais a função-objetivo (82,5 %). Na vazão de água, pode-se ver uma melhora apenas no final do histórico, por volta de 3900 a 4200 dias.

Ao adicionar mais dois parâmetros no processo (POR e PERM), pode-se observar que a redução da função-objetivo foi bem semelhante à redução obtida com dois parâmetros. A qualidade do ajuste, analisando as curvas, foi bem semelhante. Porém, o número de simulações teve uma elevação considerável, chegando a 39 para 8 níveis de discretização (Tabela 2).

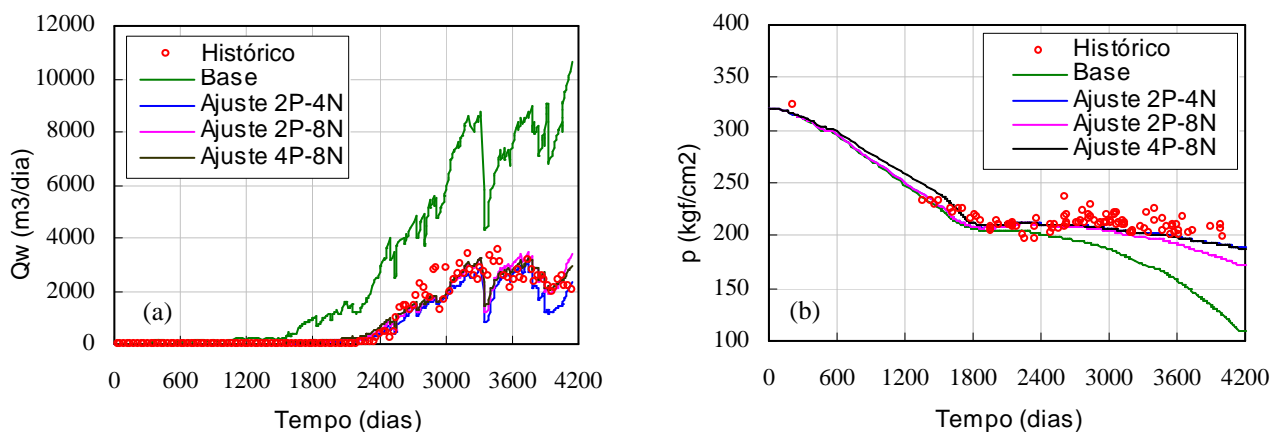


Figura 2. Ajuste inicial do campo para diferentes números de parâmetros e níveis de discretização

Foram feitas novas execuções do programa (E2 e E3 - Tabela 2), com os mesmos dados de entrada, mas com pontos de busca iniciais diferentes. Pode-se notar que há uma variação do número de simulações de uma execução para a outra, que depende muito do ponto inicial. No geral, a redução da função-objetivo se manteve bem próxima para as três execuções, exceto para a execução 2 (com 4 parâmetros e 6 níveis de discretização) e para a execução 3 (com 4 parâmetros e 8 níveis de discretização) para as quais a redução da função-objetivo foi bem menor (18,6 %). Nestes dois casos, a solução inicial caiu em uma região de mínimo local, cujo processo de busca ficou restrito a essa região. Na Tabela 3, são mostrados os valores iniciais e finais dos multiplicadores para os quatro parâmetros e para as três execuções.

Tabela 2. Eficiência da otimização em função do número de parâmetros e nível de discretização

Nº de parâmetros (np)	Discretização (nd)	Nº de simulações			Redução na FO (%)		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3
2	4	6	5	9	79,86	79,86	79,86
	6	9	9	16	79,86	79,86	80,86
	8	21	19	19	82,58	82,58	82,58
4	4	23	21	29	81,51	83,27	82,58
	6	25	17	36	82,71	18,64	82,71
	8	39	33	17	83,21	83,28	18,64

Tabela 3. Valores iniciais e finais dos multiplicadores dos 4 parâmetros utilizados

np	nd	KRW			PERMI			PERMK			POR														
		Ponto inicial			Ponto final			Ponto inicial			Ponto final														
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3												
4	0,50	0,35	0,35	0,20	0,20	0,20	0,50	0,50	0,30	0,50	0,50	0,50													
2	6	0,80	0,80	0,80	0,20	0,20	0,30	0,50	0,50	0,10	0,50	0,50	0,16												
8	0,80	0,65	0,65	0,27	0,27	0,27	0,45	0,50	0,40	0,15	0,15	0,15													
4	4	0,80	0,35	0,50	0,65	0,35	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,10	0,93	0,75	1,12	0,75	0,75	1,50	0,93	0,75	1,50	1,12	1,31		
4	6	0,30	0,80	0,30	0,30	0,80	0,30	0,37	0,37	0,43	0,17	0,37	0,17	1,50	0,87	1,00	1,50	0,87	1,50	1,50	0,75	1,25	1,00	1,12	1,00
8	0,42	0,60	0,80	0,42	0,60	0,80	0,35	0,37	0,37	0,15	0,10	0,37	1,20	0,75	0,87	1,50	1,50	0,87	1,40	1,12	0,75	1,12	1,37	1,12	

### 3.4. Combinação da função-objetivo

Na Figura 3, mostra-se o resultado da composição de duas funções-objetivo: a vazão de água e a pressão média no reservatório. Foi utilizado o caso com 4 parâmetros e 4 níveis de discretização (4N-4P). Nota-se que há uma diferença entre o ajuste feito usando apenas a vazão de água ( $Q_w$ ) e o ajuste resultante da composição da vazão de água e a pressão ( $Q_w+P$ ). As duas funções-objetivo apresentam uma diferença considerável na ordem de grandeza, o que dificulta o ajuste. Para a composição de funções funcionar corretamente, é necessária a atribuição de pesos a cada uma delas. Pode-se notar, também, que para este caso (4N-4P), mesmo com o ajuste apenas da água, há um considerável desvio entre a curva ajustada e o histórico, com relação à chegada da água, no período entre 1500 e 2400 dias. Porém, no final do histórico, há uma melhora na qualidade do ajuste, o que produz também a redução da função-objetivo, conforme visto na Tabela 2.

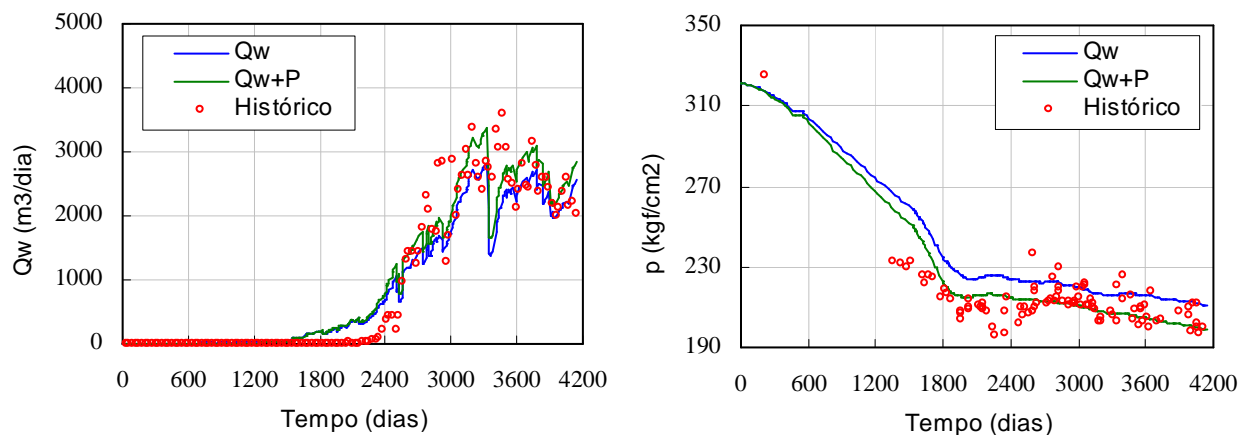


Figura 3. Efeito da combinação de duas funções-objetivo

### 3.5. Ajuste de poços e ajuste final do campo

Após o ajuste da pressão e das vazões do campo, foi feita uma análise dos poços que continuavam apresentando maior desajuste. Foram selecionados 4 poços mais desajustados e foi feito um ajuste baseado em propriedades localizadas nesses poços. Para o ajuste dos poços, foi utilizado como base o modelo resultante do ajuste inicial do campo. Foi considerada a permeabilidade vertical e horizontal, uma vez que a função-objetivo principal foi a vazão de água, e essas propriedades exercem grande influência, pois delas decorre a maior ou menor dificuldade para a água subir da Camada 5 e atingir os produtores nas camadas superiores. Na Figura 4(a) mostra-se o ajuste de um dos poços com maiores problemas (PO-036). Pode-se notar que há uma boa concordância da curva simulada com o histórico do poço. Foram adotados três procedimentos. No primeiro, realizou-se o ajuste de cada poço separadamente (Ajuste 1). No segundo, foi feito um ajuste da vazão de água do campo, usando as mesmas propriedades locais do ajuste dos poços (Ajuste 2) e, no terceiro procedimento, tentou-se ajustar simultaneamente a vazão de água dos quatro poços, porém não houve sucesso, pois a função-objetivo composta pelas funções relativas a cada poço era muito irregular. Isso ocorreu porque, de uma forma geral, as propriedades locais de um determinado poço não exercia influência em um outro poço, gerando muito mínimos locais. Na Figura 4(b) mostra-se o ajuste final do campo, seguindo os dois

primeiros procedimentos. Verifica-se que o Ajuste 1 produziu um ótimo resultado. Porém, em relação ao Ajuste 2, há um desvio em relação ao histórico, principalmente no início da chegada da água e no final do histórico, os quais são os trechos mais importantes do ajuste. Para o ajuste dos poços separadamente (Ajuste 1) foi necessário um total de 40 simulações e, para o Ajuste 2, foram necessárias 41 simulações, ou seja, praticamente o mesmo número de simulações. Porém, nesse caso, o ajuste dos poços separadamente produziu melhores resultados.

O final do processo de ajuste depende dos objetivos do estudo. A decisão de quando encerrar o processo depende, portanto, do usuário. Neste caso em particular, ainda seria possível prosseguir no refinamento do ajuste, trabalhando em um maior número de poços. No caso da pressão média no reservatório, o resultado ficou semelhante ao mostrado na Figura 2(b) (Ajuste 4P-8N), para o qual também poderia haver uma melhora. Porém, o objetivo principal deste trabalho é mostrar o uso da metodologia.

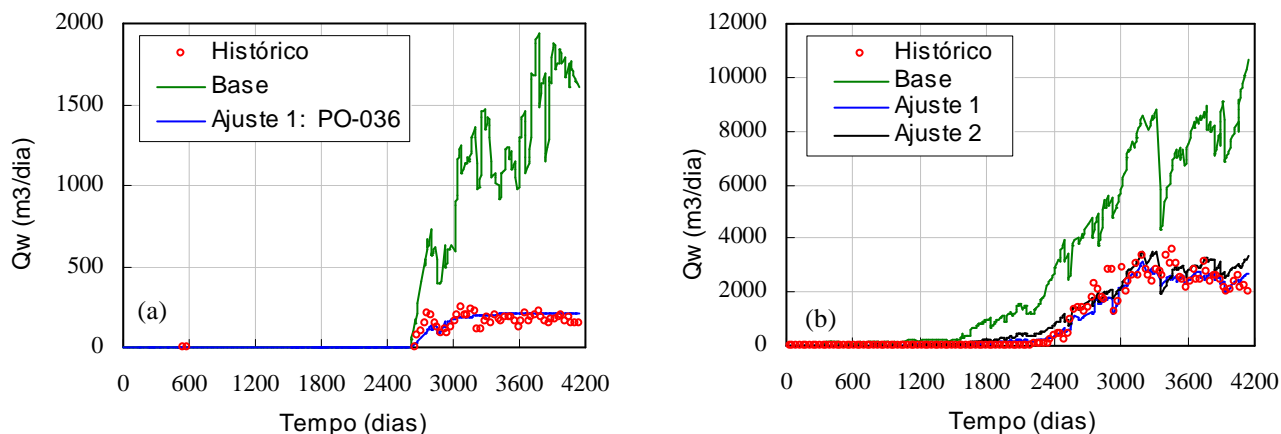


Figura 4. (a) exemplo de ajuste da vazão de água um poço, (b) ajuste do campo após o ajuste dos poços

## 6. Conclusões

Este trabalho mostrou uma aplicação de ajuste automatizado onde os parâmetros são discretizados para facilitar o processo de otimização da função-objetivo que representa a qualidade do ajuste. Pode-se concluir que a escolha adequada dos parâmetros no processo de ajuste de histórico é fundamental. Para isso, é recomendável investir algum tempo na análise de sensibilidade para que o processo de ajuste seja feito em um menor número de ciclos. A discretização dos parâmetros deve ser feita com cuidado, a fim de se evitar um número elevado de simulações. Para isso, o conhecimento da tolerância associada a cada parâmetro é bastante importante. A composição de mais de uma função-objetivo depende da aplicação e da natureza das funções. Funções com ordens de grandeza muito diferentes tendem a não serem ajustadas simultaneamente quando compostas em uma única função-objetivo. Outro fato importante é que a escolha de propriedades que não influenciam determinadas funções-objetivo incluídas no processo, dificulta bastante a solução, pois pode gerar mínimos locais.

Por fim, a eficiência da metodologia para a automatização parcial do ajuste de histórico depende da sua correta utilização. A automatização de tarefas manuais e repetitivas, bem como a aceleração do processo através da redução do tempo de simulação pelo uso da computação paralela, são as principais características da metodologia utilizada neste trabalho.

## 7. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Petrobras, FAPESP e à FINEP pelo aporte financeiro no desenvolvimento das pesquisas que resultaram no *software* utilizado neste trabalho.

## 8. Referências

- LEITÃO, H. C. AND SCHIOZER, D. J. A New Automated History Matching Algorithm improved by Parallel Computing, SPE 52977, 1999.
- LEITÃO, H. C. AND SCHIOZER, D. J. Ajuste de Histórico Automatizado através de Otimização Multivariada e Paralelização Externa, IBP 25498, *Rio Oil & Gas Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, 5-8 October, 1998.
- RAVALEC-DUPIN, M. L., FENWICK, D. H. A Combined Geostatistical and Streamline-Based History Matching Procedure, SPE 77378, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, Texas, 29 September-2 October, 2002.
- SCHIOZER, D. J. Use of Reservoir Simulation, Parallel Computing and Optimization Techniques to Accelerate History Matching and Reservoir Management Decisions, SPE 53979, *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Caracas, Venezuela, 21-23 April 1999.
- SCHIOZER, D. J., SOUSA, S. H. G. Use of External Parallelization to Improve History Matching, SPE 39062, *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, 30 August-3 September, 1997.