



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

### **CORRELAÇÕES APLICADAS À PREDIÇÃO DA PRESSÃO DE SATURAÇÃO E FATOR VOLUME DE FORMAÇÃO: ESTUDO DE CASO BACIA POTIGUAR**

Novaes, W. S.<sup>1</sup>, Dutra Jr, T. V.<sup>2</sup>, Selvam, P. V. P.<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universidade Federal do Rio Grande Norte – UFRN, Núcleo de Tecnologia – NT  
Programa de Pós – Graduação em Engenharia Química – PPGEQ  
Av. Senador Salgado Filho, Campus Universitário – Lagoa Nova, CEP: 59072 – 970 – Natal/RN  
alquimista@eq.ufrn.br<sup>1</sup>; tarcilio@eq.ufrn.br<sup>2</sup>; surnpvpa@eq.ufrn.br<sup>3</sup>;

**Resumo** – O presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho das correlações, freqüentemente encontradas na literatura, na predição das propriedades PVT para óleos provenientes de amostragem de fundo de campos da Bacia Potiguar entre outros campos do Brasil. Através da análise do desempenho das correlações com os seus respectivos coeficientes originalmente publicados e baseando-se em parâmetros estatísticos algumas correlações satisfatórias para aplicação na previsão da pressão de saturação e do fator volume de formação são recomendadas. Além de que, duas correlações foram propostas, baseadas no cálculo de novos coeficientes, para a determinação de tais propriedades. Algumas das correlações recentemente publicadas e as mais freqüentemente citadas na literatura foram comparadas com as correlações desenvolvidas. Os resultados mostraram que as correlações propostas apresentaram uma menor margem de erro e desvio padrão comparado com as correlações publicadas na literatura técnica.

**Palavras-Chave:** Correlações, Propriedades PVT, Fator Volume de Formação, Pressão de Saturação, Bacia Potiguar.

**Abstract** – The present study evaluates the performance of the most frequently used empirical correlations to predict the PVT properties for Potiguar Basin and others Brazilian crude oils. The evaluation is performed by using bottom hole fluid samples and based on statistical parameters, in order to recommend some suitable correlations for field application. In addition, two empirical PVT correlations were proposed based on new calculated coefficients for Brazilian gas/oil systems based on new calculated constants for estimating the formation volume factor and bubble point pressure. In this work, a multiple regression analysis was carried out in the developing of these correlations. Some of the recently developed correlations and those frequently used in the literature were compared to the new correlations proposed. The new correlations developed in this study exhibit significantly lower average absolute error and standard deviation than the other published correlations.

**Keywords:** Correlations, PVT Properties, Formation Volume Factor, Bubblepoint Pressure, Potiguar Basin.

## 1. Introdução

O uso de correlações empíricas, na engenharia de reservatório, para os trabalhos iniciais nos campos de petróleo, tem grande importância, uma vez que, no início da vida produtiva de um campo, não se dispõe de medidas de propriedades de fluidos provenientes de amostragem de fundo.

Porém, devido ao caráter empírico associado a cada correlação seu uso na predição de propriedades PVT não deve ser indiscriminado, tendo em vista que tal fator deve ser levado em consideração e, portanto, torna-se importante que para aplicações particulares se realize um estudo da aplicabilidade e acuracidade de cada correlação proposta, o ajuste de novos coeficientes ou até mesmo o desenvolvimento de novas correlações.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho das correlações, freqüentemente encontradas na literatura, na predição das propriedades PVT para óleos provenientes da amostragem de fundo de campos da Bacia Potiguar. Através da análise do desempenho das correlações com os seus respectivos coeficientes originalmente publicados e baseando-se em parâmetros estatísticos algumas correlações satisfatórias para aplicação na previsão da pressão de saturação e do fator volume de formação para campos da bacia potiguar são recomendadas.

## 2. Aquisição de Dados e Critérios de Avaliação

### 2.1 Aquisição de Dados

Os dados utilizados foram obtidos a partir de amostras de óleos de campos da Bacia Potiguar, além de outros campos de diferentes regiões do Brasil. As propriedades usadas foram: temperatura da formação, densidade relativa do óleo (água = 1), razão de solubilidade, densidade relativa dos gases (ar = 1), grau API do óleo, pressão de saturação e fator volume de formação. As faixas das propriedades utilizadas neste estudo estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Range dos dados utilizados na avaliação das correlações.

Pressão de saturação (psia)	Temperatura da formação (°F)	Razão de solubilidade (scf/STB)	Densidade relativa do gás (ar = 1)
$214,4 < P_b < 3701,7$	$100,4 < T < 248,0$	$17,5 < R_s < 1492,1$	$0,630 < \gamma_g < 1,323$

Tabela 2 – Range dos dados utilizados na avaliação das correlações.

Densidade relativa do óleo (água = 1)	Grau API	Fator volume de formação (bbl/STB)
$0,606 < \gamma_o < 0,935$	$16,4 < \text{°API} < 42,6$	$>1,025 < B_o < 1,851$

### 2.2 Critérios de avaliação

Os critérios de avaliação utilizados foram os mesmos usados por Al-Shammasi (2001). Os critérios usados pelo autor baseiam-se em análises gráficas e em parâmetros estatísticos como definidos abaixo.

#### 3.2.1 Erro relativo ( $E_r$ )

O erro relativo corresponde à identificação do desvio relativo de um valor previsto em relação a um valor experimentalmente observado que é definido segundo a Equação 1 onde  $n_d$  corresponde ao número de pontos.

$$E_r = \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} E_i \quad \text{e} \quad E_i = \left( \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{est}}}{X_{\text{exp}}} \right)_i \times 100 \quad \text{para } (i = 1, 2, \dots, n_d) \dots \dots \dots (1)$$

#### 3.2.2 Erro absoluto ( $E_a$ )

O erro absoluto indica o desvio relativo absoluto de um valor predito em relação a um valor experimentalmente observado percentualmente. E pode ser expresso por:

$$E_a = \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} |E_i| \dots \dots \dots (2)$$

#### 3.2.3 Erro absoluto mínimo e máximo ( $E_{\min}$ e $E_{\max}$ )

Ambos os erros mínimo e máximo são determinados pela análise do erro absoluto. Os valores mínimos e máximos são determinados para mostrar a faixa de erro para cada correlação e pode ser expressa por:

$$E_{\min} = \min |E_i| \quad \text{e} \quad E_{\max} = \max |E_i| \dots \dots \dots (3)$$

### 3.2.3 Desvio Padrão (S)

O desvio padrão é uma medida da dispersão dos erros preditos para uma determinada correlação, e é definido segundo a Equação 4 onde um menor valor no desvio padrão implica em um baixo grau de dispersão nas proximidades dos erros médios calculados.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n_d - 1} \sum_{i=1}^{n_d} (E_i - E_r)^2} \dots\dots\dots(4)$$

## 3. Resultados e Discussões

### 3.1 Fator Volume de Formação, B<sub>o</sub>

No Estudo do fator Volume de formação, os trabalhos publicados por Al-Shammasi (2001), Elsharkawy–Alikhan (1995 e 1997), Mohmood – Al-Marhoun (1996), Elsharkawy–Alikhan (1996), McCain (1998) e Whitson-Brulé (2000) citam e apresentam as correlações propostas por: Standing (1947), Vazquez e Beggs (1980), Al-Marhoun (1988), Glaso (1980), Abdul-Majeed e Salman (1988), Dokla e Osman (1992), Petrosky e Farshad (1993), Farshad et al (1992), Al-Marhoun (1992), Omar e Tood (1993), Almehaidel (1997), Macary e Batanoney (1992) e Kartoatmodjo (1994).

Tabela 3 – Resultados dos parâmetros estatísticos para a estimativa de B<sub>o</sub>.

Correlação	E <sub>r</sub>	E <sub>a</sub>	E <sub>max</sub>	E <sub>min</sub>	S
Standing (1947)	-0,7912	2,32	0,0028	14,04	3,02
Vazquez and Beggs (1980)	2,9102	3,39	0,1583	14,18	2,66
Glaso (1980)	1,6903	3,15	0,1615	13,03	2,45
Abdul-Majeed and Salman (1988)	-55,311	55,31	14,81	490,51	78,02
Dokla and Osman (1992)	23,112	23,11	17,84	33,54	3,54
Petrosky and Farshad (1993)	-3,2806	4,49	0,0440	31,17	6,94
Farshad et al (1992)	-2,4206	4,80	0,0202	44,53	8,82
Al-Marhoun (1992)	-0,9037	2,76	0,0066	16,78	3,89
Omar and Tood (1993)	1,6857	2,98	0,0413	12,38	2,44
Almehaideb (1997)	-1,8267	4,73	0,0514	22,16	4,45
Macary e El-Batanoney(1992)	-6,2608	6,49	2,19	14,09	2,40
Kartoatmodjo (1994)	-1,9072	4,12	0,0281	32,55	6,62

Utilizando dados provenientes de amostras de óleos da bacia Potiguar e de outras regiões do Brasil avaliou-se o desempenho de cada correlação citada acima, com seus respectivos coeficientes originalmente publicados, através dos critérios de avaliação adotados pelo presente trabalho. Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 3, exceto para Al-Marhoun (1988) que apresentou um erro bastante elevado.

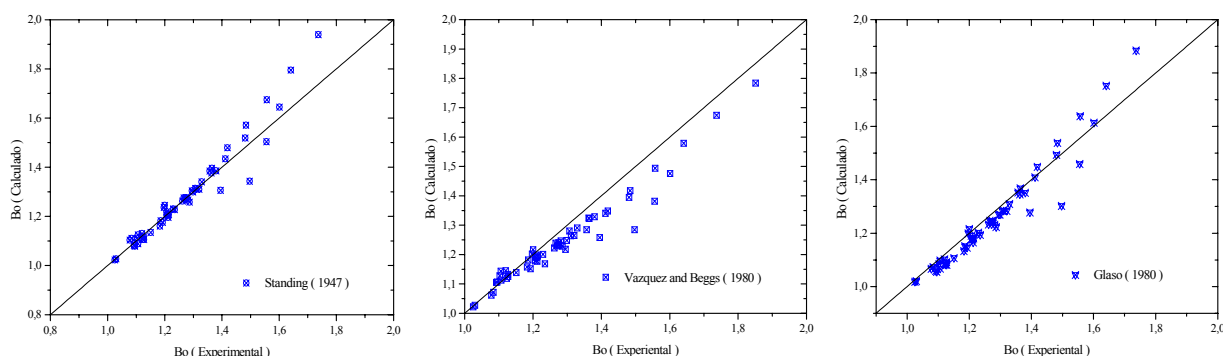
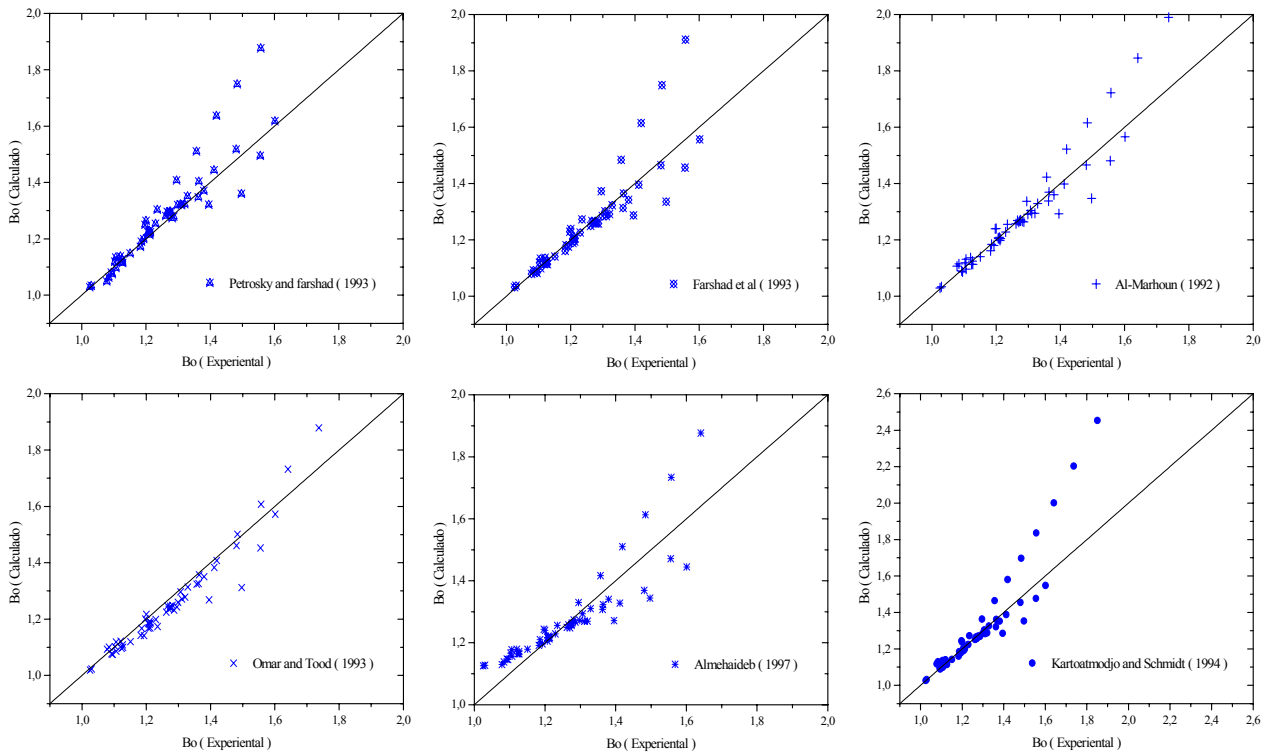


Figura 1 - Comparação ente os valores de B<sub>o</sub> calculado segundo Standing (1947), Vazquez e Beggs (1980) e Glaso (1980) em função dos valores experimentalmente observados.

A Figura 1 apresenta as análises gráficas do desempenho das correlações que conseguiram melhor representar os dados experimentais, exceto Abdul-Majeed and Salman (1988), Dokla and Osman (1992) e Macary e El-Batanoney (1992) pois obtiveram erros inaceitáveis do ponto de vista técnico. No eixo das ordenadas encontram-se os dados experimentais e no eixo da coordenadas os dados previstos pelos modelos.



Continuação Figura 1 - Comparação entre os valores de  $B_o$  calculado segundo Petrosky e Farshad (1993), Farshad et al (1980), Al – Marhoun (1992), Omar e Todd (1993), Almehaideb (1997), Kartoatmodjo e Schmidt (1994) em função dos valores experimentalmente observados.

Através da análise dos dados apresentados na Tabela 3 e da Figura 1 conclui-se facilmente que a correlação proposta por Standing (1947) foi a que obteve o melhor resultado. Sendo assim, a análise de regressão para o ajuste dos novos coeficientes foi realizado a partir do modelo proposto pelo autor. A equação abaixo apresenta o modelo originalmente proposto por Standing, Al-Shammasi (2001).

$$B_o = a_1 + a_2 \cdot [R_s (\frac{\gamma_g}{\gamma_o})^{a_3} + a_4 \cdot T]^{a_5} \dots\dots\dots(5)$$

Os coeficientes originalmente propostos por Standing (1947) são:  $a_1 = 0,972$ ;  $a_2 = 1,472 \times 10^{-4}$ ;  $a_3 = 0,5$ ;  $a_4 = 1,25$  e  $a_5 = 1,175$ .

Escolhido o modelo, o passo seguinte consiste em recalcular novos coeficientes de correlação utilizando os dados experimentais. Os novos coeficientes foram calculados através de uma análise de regressão não-linear utilizando o “Solve” do MS Excel 2000. A Tabela 4 apresenta os novos coeficientes calculados.

Com os novos valores dos coeficientes de correlação foi realizada uma nova avaliação utilizando o modelo de Standing (1947). O erro relativo absoluto observado foi de 1,3%.

A Figura 2 apresenta análise gráfica da nova correlação com os novos coeficientes calculados.

Tabela 4 – Novos coeficientes de correlação para  $B_o$  a partir do modelo proposto por Standing (1947).

Coeficiente	Valor
$a_1$	0,999496668
$a_2$	0,00083769
$a_3$	0,38788845
$a_4$	0,468552635
$a_5$	0,923551816

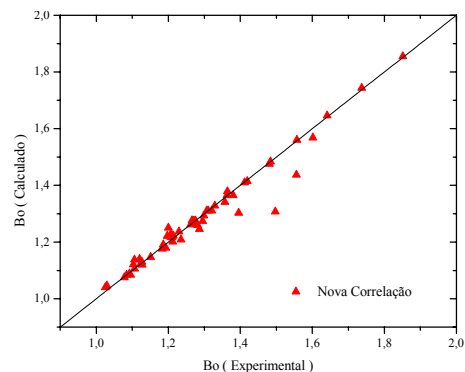


Figura 2 – Comparação entre os valores de  $B_o$  calculado segundo a Nova Correlação Proposta e os valores experimentalmente observados

**3.2 Pressão de Saturação ou Pressão de Bolha, P<sub>b</sub>**

A mesma metodologia empregada na avaliação das correlações para B<sub>0</sub> foi utilizada para P<sub>b</sub>. Foram utilizadas as correlações propostas por: Standing (1947), Vazquez e Beggs (1980), Al-Marhoun (1988), Glaso (1980), Abdul-Majeed e Salman (1988), Dokla e Osman (1992), Petrosky e Farshad (1993), Farshad et al (1992), Al-Marhoun (1992), Omar e Tood (1993), Almehaidel (1997), Macary e Batanoney (1992) e Kartoatmodjo e Schmidt (1994). Publicadas por Al-Shammasi (2001).

A Tabela 5 apresenta os parâmetros estatísticos para cada autor, exceto para as correlações que apresentaram elevados erros, sendo, portanto descartadas e a Figura 3 apresenta de forma mais clara, através de análises gráficas o desempenho apresentado por cada autor com seus coeficientes originalmente publicados, Exceto para Macary e El-Batanoney (1992).

Tabela 5 - Resultados dos parâmetros estatísticos para a estimativa de P<sub>b</sub>.

Correlação	E <sub>r</sub>	E <sub>a</sub>	E <sub>max</sub>	E <sub>min</sub>	S
Standing (1947)	-11,28	18,72	62,84	0,2081	11,13
Dokla and Osman (1992)	1,570	13,11	82,66	0,1958	13,65
Farshad et al (1992)	3,166	15,28	75,18	0,3709	15,65
Al-Marhoun (1992)	-16,31	28,36	95,62	1,7173	20,03
Almehaideb (1997)	-10,04	15,31	49,79	0,1426	10,78
Macary e El-Batanoney (1992)	21,16	29,41	197,62	0,3053	31,05
Kartoatmodjo e Schmidt(1994)	-6,013	17,42	74,40	0,9819	12,02

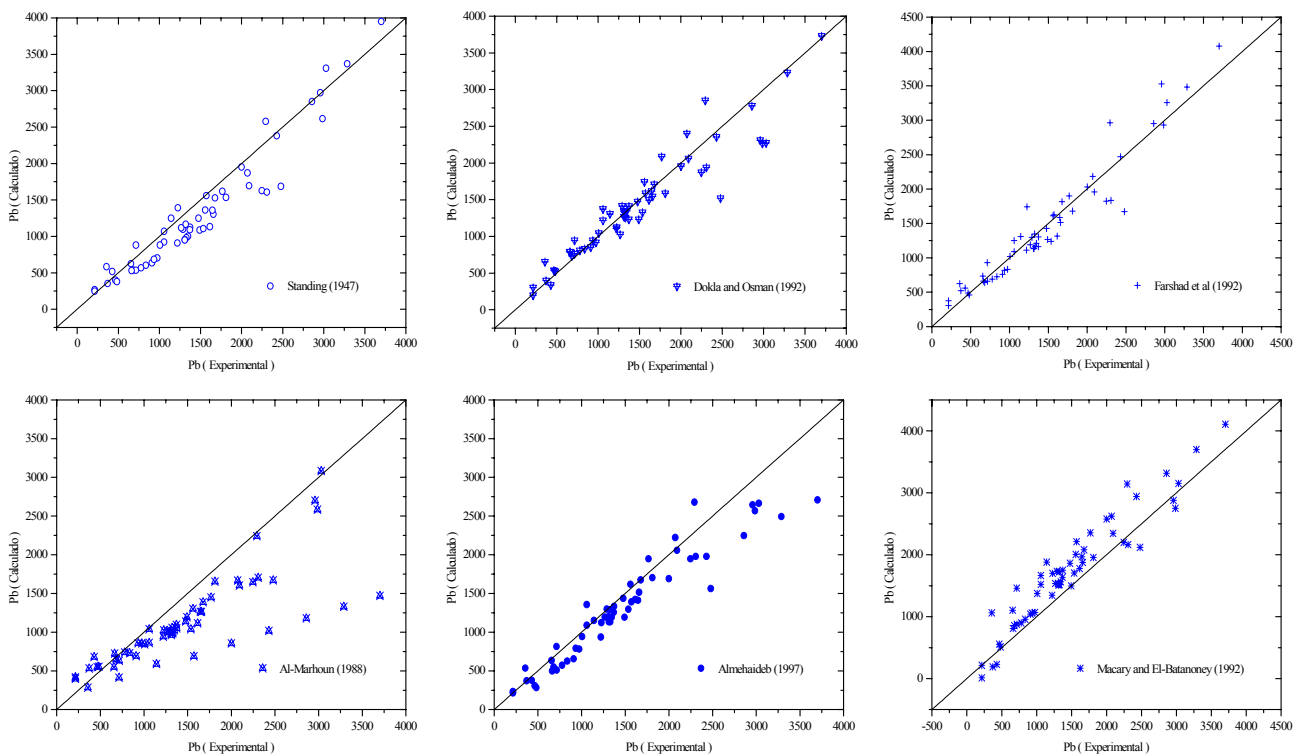


Figura 3 - Comparação entre os valores de P<sub>b</sub> calculado segundo Standing (1947), Dokla and Osman (1992), Farshad et al (1992), Al-Marhoun (1992), Almehaideb (1997) e Kartoatmodjo e Schmidt(1994) em função dos valores experimentalmente observados.

Segundo os dados apresentados na Tabela 5 e a partir da análise da Figura 3 facilmente conclui-se que a correlação proposta por Dokla e Osman (1992) foi a que obteve os melhores resultados. Portanto, a análise de regressão para o ajuste dos novos coeficientes foi realizado a partir do modelo proposto pelo autor. A equação abaixo apresenta o modelo originalmente proposto por Dokla e Osman, Al-Shammasi (2001). Os coeficientes originalmente propostos pelo autor são: a<sub>1</sub> = 0,836386x10<sup>4</sup>; a<sub>2</sub> = 0,724047; a<sub>3</sub> = -1,01049; a<sub>4</sub> = 0,107991 e a<sub>5</sub> = -0,954584.

$$p_b = a_1 \cdot R_s^{a_2} \gamma_g^{a_3} \gamma_o^{a_4} (T - 460)^{a_5} \dots\dots\dots(6)$$

Tabela 6 – Novos coeficientes de correlação para  $P_b$  a partir do modelo proposto por Dokla e Osman (1992).

Coefficiente	Valor
$a_1$	0,792
$a_2$	0,856
$a_3$	-1,665336465
$a_4$	1,041151931
$a_5$	0,393741157

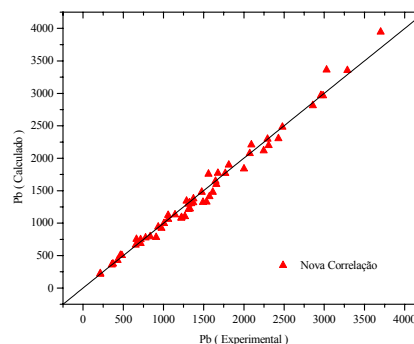


Figura 4 - Comparação entre os valores de  $P_b$  calculado segundo a Nova Correlação Proposta e os valores experimentalmente observados.

Selecionado o modelo, e da mesma forma que para  $B_o$ , o passo seguinte consiste em recalculer os novos coeficientes de correlação utilizando os dados experimentais. Os novos coeficientes foram calculados através de uma análise de regressão não-linear utilizando o “Solve” do MS Excel 2000. A Tabela 6 apresenta os novos coeficientes calculados.

Com os novos valores dos coeficientes de correlação foi realizada uma nova avaliação utilizando o modelo de Dokla e Osman (1992). O erro relativo absoluto observado foi de 4,8017%. A Figura 4 apresenta o desempenho apresentado pela nova correlação.

#### 4. Conclusões

1. Simples correlações foram propostas baseadas no ajuste de novos coeficientes para a pressão de saturação e fator volume de formação com melhor acuracidade do que as outras correlações encontradas na literatura com seus respectivos coeficientes originalmente publicados. Tais equações foram estabelecidas utilizando dados de campos da Bacia Potiguar e de outras regiões do Brasil;
2. Entre as correlações existentes na literatura a proposta por Standing (1947) foi a que obteve melhores resultados, podendo ser recomendada para a estimativa do  $B_o$  dos óleos dos campos estudados. Por outro lado, as correlações propostas por Macary e El-Batanoney (1992) e Abdul-Majeed and Salman (1988) apresentaram os piores resultados, e inaceitáveis do ponto de vista técnico;
3. Todas as correlações existentes para a previsão da pressão de saturação estudadas nesse trabalho apresentaram erros fora da faixa de tolerância, portanto não se recomenda a utilização destas correlações para os tipos de óleos estudados;
4. As novas correlações propostas apresentaram erros dentro de faixas toleráveis. Entretanto, deve-se tomar cuidado com o range de validade para cada correlação, principalmente para a pressão de saturação.

#### 4. Agradecimentos

Os autores gostariam de dedicar seus sinceros agradecimento a Agência Nacional do Petróleo – ANP em especial ao Programa de Recursos Humanos – PRH 14 pelo apoio financeiro e Universidade Federal do Rio Grande do Norte pela infra-estrutura disponibilizada para a realização do presente trabalho.

#### 5. Referências

- AL-SHAMMASI, A. A. A Review of Bubblepoint Pressure and Oil Formation Volume Factor Correlations, SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Richardson, Texas, April, 2001. 2, 4, p. 146-160.
- ELSHARKAWY, A. M., ELGIBALY, A. A., ALIKHAN, A. A. Assessment of the PVT Correlations for Predicting the Properties of Kuwaiti Crude Oils Journal of Petroleum Science and Engineering, 1995. 13, p. 219-232.
- ELSHARKAWY, A. M., ALIKHAN, A. A. Correlations for Predicting Solution Gas/Oil Ratio, Oil Formation Volume Factor, and Undersaturated Oil Compressibility J. of Petroleum Science and Engineering, 1997. 17, p. 291-302.
- MCCAIN, W. D. JR. Correlation of Bubblepoint Pressures for Reservoir Oils - A Comparative Study, Paper SPE 51086 In: SPE EASTERN REGIONAL CONFERENCE, Pittsburgh, PA. , 1998.
- MOHMOOD, M. A., AL-MARHOUN M. A. Evaluation of Empirically Derived PVT Properties for Pakistani Crude Oils, Journal of Petroleum Science and Engineering, 1996. 16, p. 275-290.
- WHITSON, C. H, BRULÉ, M. R. Phase Behavior Richardson, Texas, 2000. Monograph (vol. 20, Henry L. Doherty series) - AIME, Society of Petroleum Engineers.