

Utilização da tecnologia de perfis de nêutrons pulsantes em poços maduros no Nordeste do Brasil

Introdução

Este artigo tem como objetivo apresentar a tecnologia dos perfis de nêutrons pulsantes na avaliação de poços maduros, permitindo nova intervenção e completação.

Vai-se abordar um estudo de caso de utilização desta tecnologia na Bahia, no período 1997-2007.

Neste período utilizou-se esta tecnologia na avaliação de mais de 150 poços maduros, em que se efetuou novas recompletações com sucesso em 85% dos poços avaliados, que possibilitou um aumento de produção na ordem dos 45-50%, e uma significativa redução do BSW dos poços maduros, segundo dados da Petrobras. Vários poços que já estavam abandonados foram reativados com esta tecnologia.

Os perfis de nêutrons pulsantes permitem calcular as novas Saturações de HCs (óleo ou gás) de poços maduros, assim como os novos contatos óleo/gás/água, que permitem corrigir a produção de água e avaliar estes poços para recuperação secundária.

Descrição do perfil de nêutrons pulsantes

Teoria

Os perfis de nêutrons pulsantes contêm um gerador linear que bombardeia para a formação acima de 100 milhões de nêutrons por segundo, com alto nível energético, maior de 6 MeV (seis milhões de eletro-volts ou $6 \cdot 10^6 \text{ eV}$). Conforme estes nêutrons interagem com os elementos químicos presentes na rocha, vão perdendo energia até serem capturados.

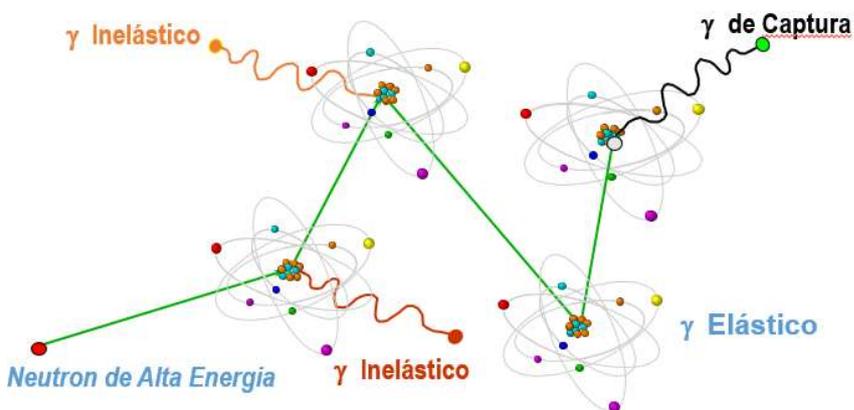


Figura 1: Esquema de interação de nêutrons pulsantes com os elementos presentes na formação

O perfil carbono-oxigênio toma em consideração a colisão inelástica de nêutrons com os elementos químicos da formação nos primeiros 10 microssegundos, em que cada colisão gera um raio gama.

A seguir, com mais colisões e interação com elementos da formação, a energia dos nêutrons vai decaindo para níveis epitérmico e térmico, e a partir de 1000 microssegundos os nêutrons começam a ser capturados por elementos da formação que ao serem capturados libertam raios gama, que é a base do perfil de nêutron de captura ou Sigma Σ .

Adicionalmente obtém-se a curva de ativação de nêutrons como a ativação de oxigênio que mostra circulação de fluido atrás do revestimento, que é sintoma duma comunicação entre zonas causada por uma cimentação deficiente.

A tabela 1 é a classificação de nêutrons em função da energia do nêutron.

Classificação de nêutrons	Energia
Térmico	0.025 eV a 0.1 eV
Epitérmico	0.1 eV a 10 eV
Intermediário	10 eV a 1 MeV
Rápido	1 MeV a 10 MeV
Alta Energia	Maior que 10 MeV.

Tabela 1: Classificação de nêutrons

Para o caso dum perfil CO e de captura, os nêutrons pulsantes são gerados por um feixe acelerado de átomos de deutério 2H (ou D), que atinge um alvo de trítio 3H (ou T) impregnado, os átomos compostos à posteriori decaem em uma partícula alfa e um nêutron de 14 MeV.

A explosão de nêutrons ocorre durante 15 ms (milissegundos ou 10^{-3} segundos), numa frequência de 10 kHz; o gerador emite explosões de nêutrons com uma largura de 30 μs (microsegundos ou milionésimo de segundo ou 10^{-6} segundos) cada 100 μs ; depois de 15 ms, há uma pausa de 5 ms usada para medir a radiação de fundo (ou background), que totaliza um ciclo de 20 ms.

Quatro espectros de raios gama são medidos: inelástico, captura 1, captura 2 e de fundo.

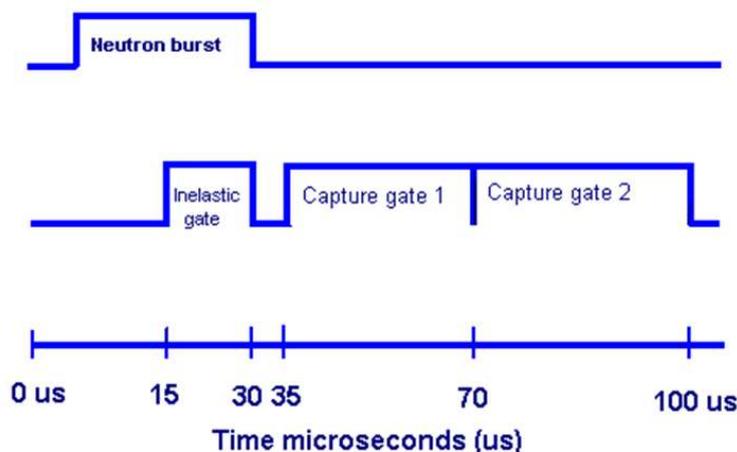


Figura 2: Janelas de tempo para geração de nêutrons e detecção de raios gama

A energia libertada na forma de raios gama é característica de cada partícula elementar envolvida na interação dos núcleos.

No caso de colisões inelásticas, os neutrões interagem com os núcleos de O, C, Ca, e Si, e os seus níveis de energia são fornecidos na tabela 2.

Elemento	Nível de energia de raios gama MeV
Oxigénio	6.13
Carbono	4.44
Calcio	3.73
Silício	1.78

Tabela 2: Nível de energia de raios gama característico para cada elemento em caso de colisões inelásticas

No caso de raios gama de captura, os níveis de energia referentes a cada partícula elementar são fornecidos na tabela 3.

Elemento	Nível de energia de raios gama MeV
Hidrogénio	2.22
Ferro	7.64
Cálcio	6.42/4.42
Cloro	6.11
Silício	3.54/4.93

Tabela 3: Nível de energia de raios gama de captura característico para cada elemento

Os detectores de raios gama são cristais cintilantes, geralmente de 3 tipos: BGO Bismuto Germânio ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), GSO Galio Silício Oxigênio (Gd_2SiO_5) e NaI. Na tabela 4 informa-se as características comparativas dos detectores.

Detetor	Diâmetro (pol)	Comprimento (pol)	Densidade (gm/cc)	Penetração de Gama (cm)	Estabilidade à temperatura	Resolução de energia %
BGO	1.4	6	7.13	0.5	Baixa	9.3
GSO	1.1	6	6.71	0.7	Alta	8.0
NaI	1.11	6	3.67	1.5	Alta	6.5

Tabela 4: Características dos detectores de raios gama



Figura 3: Cristal detetor de raios gama

Natureza de medição do perfil carbono oxigênio

Os raios gama são detectados somente durante a geração de nêutrons, que depois de algumas colisões inelásticas, perdem quase instantaneamente energia, atingindo valor inferior a 6 MeV. Os nêutrons com alto nível energético (> 6 MeV) interagem com 4 elementos da formação para produzir raios gama inelásticos: carbono, oxigênio, cálcio e silício.

A razão C/O é um indicativo da presença de hidrocarboneto ou de água.

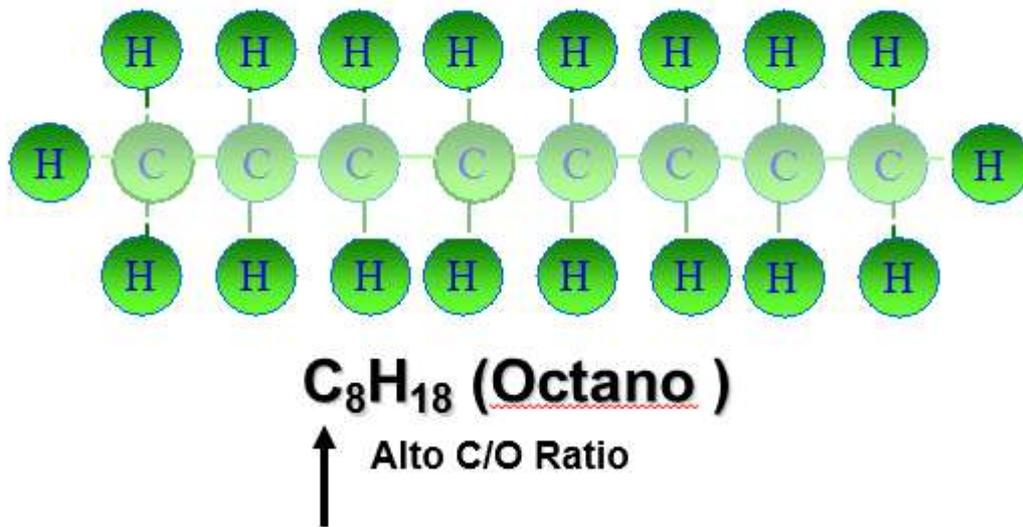


Figura 4: Presença de hidrocarboneto sem água. Não existe O.

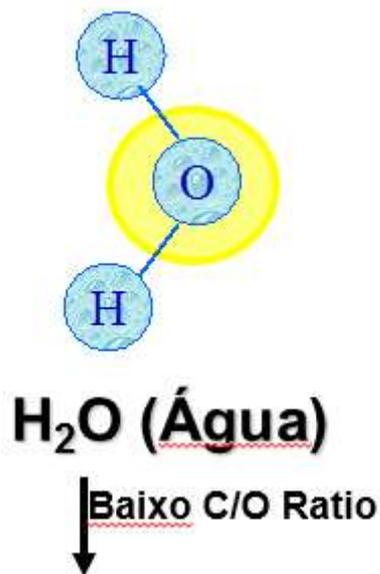


Figura 5: Presença de água sem hidrocarboneto. Não existe C.

Em zonas com presença de óleo, o perfil indica alta razão de carbono/oxigênio, enquanto que em zonas saturadas com água a razão carbono/oxigênio é baixa.

Em formações calcárias (CaCO₃) ou dolomitas (CaMg(CO₃)₂) existe carbono da formação que contribui para o aumento da razão de C, que tem de ser diminuído para só se tomar em consideração o carbono de hidrocarbonetos. Em arenitos (SiO₃) não ocorre carbono, mas ocorre oxigênio que diminui a razão C/O, assim que tenha de se eliminar o efeito da litologia para determinar a saturação verdadeira da água.

Então neste perfil é fundamental o conhecimento antecipado da litologia.

O perfil carbono-oxigênio é muito estatístico e deve ser corrido a muito baixa velocidade ou com pelo menos três passadas à velocidade de perfilagem de 1,0-1,5 m/s para aumentar a população de raios gama correspondentes a nêutrons altamente energéticos. Dependendo da ferramenta a velocidade de perfilagem pode ser menor.

Natureza de medição do perfil de nêutron de captura

Quando o neutrão perde bastante energia com diversas colisões inelásticas e elásticas, atingindo o estado térmico, eventualmente é capturado pelo núcleo dum elemento, principalmente hidrogênio e cloro, libertando um raio gama de captura. Os raios gama de captura são detectados por 2 detectores de gama, um perto e o outro mais distante do gerador. O detector perto toma em consideração o efeito do fluido do poço, para deduzir da leitura do detector longe e assim obter-se um valor de Sigma representativo da formação.

A população de nêutrons termalizados decai exponencialmente segundo equação 1 e de modo diferente conforme o fluido presente na formação, representado na figura 6.

$$N = N_0 e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau}} + B \quad (1)$$

N: número de nêutrons no tempo t

N₀: número de nêutrons inicialmente

τ: tempo que leva a população de neutrões a decair 63%

B: background ou fundo.

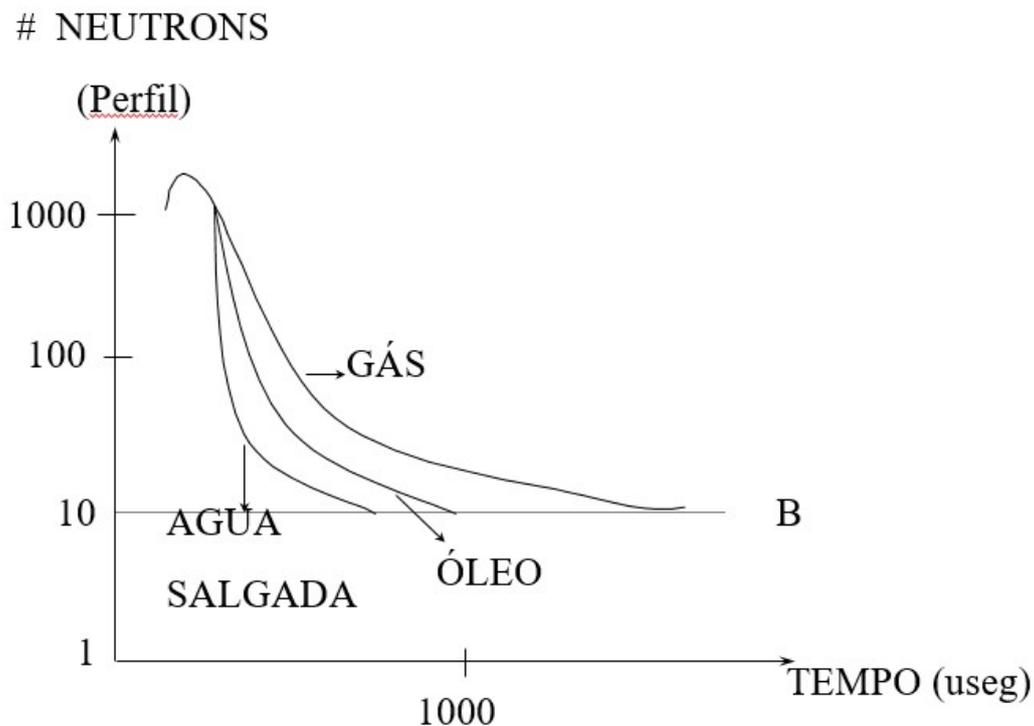


Figura 6: Decaimento da população de neutrões dependendo do fluido existente

O objetivo é medir a inclinação da porção linear da curva exponencial de decaimento.

A ferramenta tem várias janelas de tempo que medem o número de neutrões construindo a curva de decaimento, conforme figura 7; as janelas 1 e 2 medem praticamente a influência do poço na medição, enquanto que a janela 6 possui predominantemente raios gama de captura provenientes da formação. Depois de cada emissão, é programado um período para se ler a radiação de fundo (ou background), conforme a figura 8. No caso deste exemplo duma ferramenta, a sequência é 1250 emissões de neutrão, depois uma leitura de fundo (background) e novamente 1250 emissões.

RAIOS GAMMA
DE CAPTURA

MEDIÇÃO DE Σ

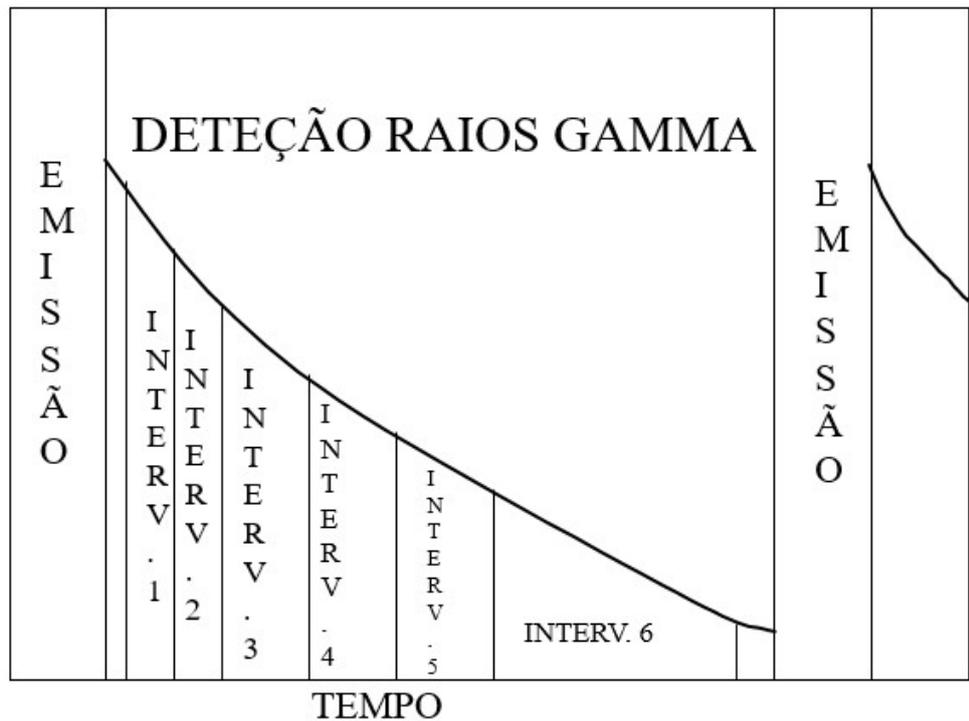


Figura 7: Janelas de tempo para medir o Sigma Σ .

RG

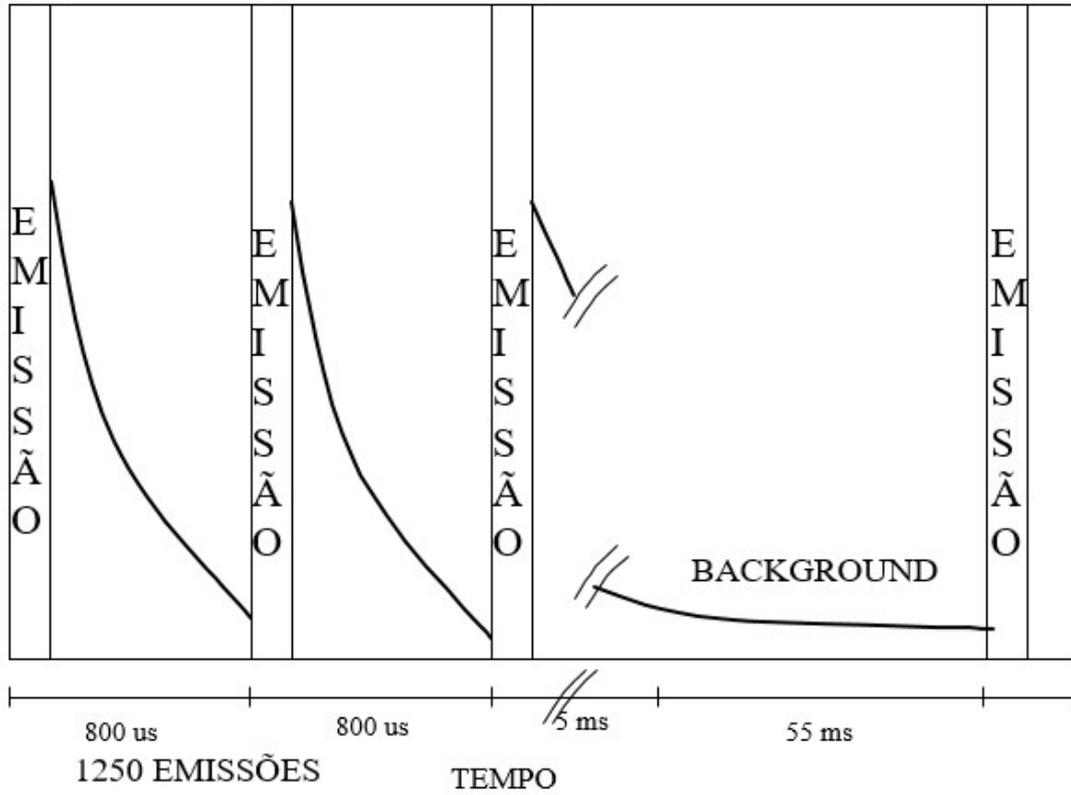


Figura 8: Programação das janelas de tempo para emissões de neutrão e background

Finalmente obtém-se a curva exponencial representada na figura 9, que tem duas inclinações, uma em que o poço é predominante e outra em que a formação é o efeito predominante.

CURVA COMPOSTA PARA SIGMA

RG

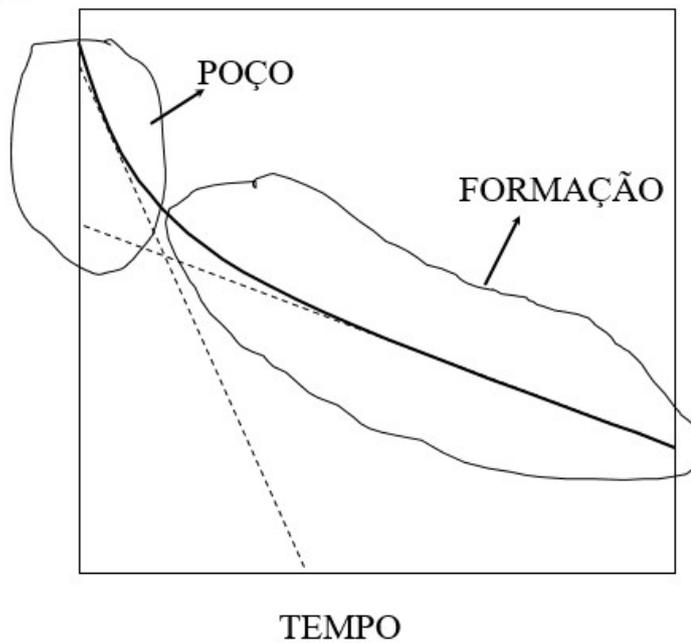


Figura 9: Curva composta para Sigma

Sigma Σ é a probabilidade de captura de um nêutron térmico pelos materiais do meio ambiente (poço e formação) medido em unidades de captura (C.U.).

Quanto maior a seção de captura, maior a probabilidade do evento de captura ocorrer. A tabela 5 mostra valores de Σ para vários materiais.

Σ MATERIAIS	
Material	Σ (CU)
Água fresca	22
Água com 50,000 ppm de sal	38
Água com 100,000 ppm de sal	58
Água com 150,000 ppm de sal	77
Água com 200,000 ppm de sal	98
Água com 250,000 ppm de sal	120
Óleo cru	22
Óleo no reservatório	21
Gás	<10
Arenito	6-13
Calcário	6-14
Dolomita	6-12
Anidridos	13-21
Argilas	25-50

Tabela 5: Σ de diversos materiais

Com estas medições e sabendo os valores de Sigma correspondentes aos diversos materiais, obtêm-se a porosidade e saturações de água, óleo e gás. Como os valores de Σ da água fresca e do óleo cru são iguais, este método não permite a identificação de óleo num reservatório que contenha água doce. Mas é um bom identificador da presença de gás, que apresenta valores de Sigma baixos.

A velocidade de perfilagem do perfil de neutrão de captura é a normal, cerca de 8-10 m/s. Os perfis de neutrões pulsantes possuem adicionalmente curvas de qualidade para monitorar o bom funcionamento da ferramenta e a qualidade dos dados sendo adquiridos e adicionalmente o perfil de raios gama para correlação.

Ferramentas disponíveis no mercado

Esta tecnologia é disponibilizada pelas companhias de perfilagem de poços de petróleo como a Halliburton, Schlumberger, Baker, etc.

Existem ferramentas que combinam o perfil de carbono-oxigênio e de neutrão de captura diminuindo o tempo de perfil, ou ferramentas individuais para cada tecnologia.

Geralmente as ferramentas disponíveis têm diâmetros de 1 11/16, 2 1/8 e 3,375 polegadas. As duas menores são para registros dentro da coluna de produção e podem descer conectadas ao perfil de produção. A ferramenta de 3,375 pol necessita que se deseque o poço.

Estudo-caso da implementação da tecnologia no Nordeste do Brasil

A Petrobras trabalhou com a Halliburton em um projeto que se desenvolveu entre 1997 e 2006. Ao longo deste projeto foram realizadas operações com geradores de nêutrons em cerca de 150 poços na sua grande maioria com os autores deste artigo como engenheiros responsáveis pelas perfilagens realizadas.

Os trabalhos foram desenvolvidos nos campos de : Araças, Buracica, Fazenda Imbé, Fazenda Rio Branco, Taquipe, Fazenda Balsamo, Fazenda Boa Esperança, Água Grande, Taquipe, Remanso, e Candeias. Os resultados nestes poços possibilitaram a identificação de óleo não drenado em frações de reservatório que não estão abertos à produção, assim como a identificação de mobilidade em determinadas formações rochosas ao longo dos anos de produção, o que resultou em identificação de zonas a serem fechadas e outras a serem abertas, gerando uma otimização em todo o processo de recompletação. O projeto teve resultados positivos em cerca de 85% dos poços perfilados, resultando em um incremento de aproximadamente 45-50% nos seus volumes produzidos.

Conclusão :

Os resultados alcançados superaram as expectativas iniciais da Petrobras, com aumento da produtividade, com um ótima razão custo-benefício, sendo possível a reversão da tendência do declínio de produção dos campos.

O uso dos geradores de nêutrons possibilitou a melhor definição das zonas a serem canhoneadas em recompletações. É uma tecnologia que vem se modernizando constantemente em hardware e software.

À vista do que foi exposto, a técnica de utilização de geradores de neutros para a definição das zonas a serem canhoneadas em recompletações, deveria ser mantida como opção geradora de excelentes resultados de produção em outros poços maduros.

Sobre os Autores:

Jorge Manuel Dinis, Mestre MSc em Engenharia de Petróleo, Universidade do Estado da Louisiana, LA, EUA. Ex-engenheiro da Halliburton. Realizou mais de 80 registros de poços no período que compreende o projeto de geradores de nêutrons

Raul César Mello dos Santos, Mestre Msc em projetos, Universidade UNIFAC'S, BA, Brasil. Ex-engenheiro da Halliburton. Realizou mais de 100 perfilagens de poços no período que compreende a primeira fase do projeto de geradores de nêutrons.

Referências :

Jacobson, L.A., and Wyatt, D.F, 1996, Elemental yields and complex lithology analysis from the pulsed spectral gamma log: The Log Analyst, v.37, no.1, January/ February, p. 50 - 64.

Mickael, M.W., Gilchrist, W.A., Mirzwiniski, R.J., Salaita, G.N., and Rajasingam, R.T., 1997, Interpretation of the response of a new through-tubing carbon/oxygen instrument using numerical modeling techniques, paper J, in 38th Annual Logging Symposium Transactions: Society of Professional Well Log Analysts, p. J1 - 14.

Roscoe, B.A., Stoller, C., Adolph, R.A., Boutemy, Y., Cheeseborough, J.C., Hall, J.S., McKeon, D.C., Pittman, D., Seeman, B., and Thomas, S.R., 1991, A new

through-tubing oil saturation measurement system, SPE 21413, in SPE Middle East Oil Show Proceedings: Society of Petroleum Engineers, p 659 668.

Schultz, W.E., Smith, H.D., Verbout, J.L., Bridges, J.R., and Garcia, G.H., 1983, Experimental basis for a new borehole corrected pulsed neutron capture logging system (TMD), paper CC, in 24th Annual Logging Symposium Transactions: Society of Professional Well Log Analysts, p. CC1 - 15.