



UNIVERSIDADE TIRADENTES  
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**GEOTERMIA E PERFIS DE TEMPERATURA**

Gilvânia dos Santos

Aracaju - SE

2018

UNIVERSIDADE TIRADENTES – UNIT  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO

**GEOTERMIA E PERFIS DE TEMPERATURA**

Gilvânia dos Santos

Trabalho de conclusão de curso apresentada à  
Universidade Tiradentes – UNIT, Campus  
Farolândia, como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
de Petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Borba.

Aracaju - SE

2018

Gilvania dos Santos

## **GEOTERMIA E PERFIS DE TEMPERATURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentada à  
Universidade Tiradentes – UNIT, Campus  
Farolândia, como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
de Petróleo.

Aprovado em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

### **BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. CLÁUDIO BORBA

---

Prof. JOSAN FIGUEIREDO CARVALHO

---

MSc. FELIPE ABREU

À memória de meu pai, Genivaldo dos Santos,  
trabalhador incansável e exemplo de  
honestidade.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, meu Grande Mestre!

À Simone Gomes, minha orientadora nesta vida, segunda mãe que me guiou, me mostrando o caminho do bem e da vitória.

Aos meus pais, Genivaldo (*in memoriam*) e Maria do Carmo, obrigada pela vida e pela torcida nesta trajetória.

Às minhas irmãs, Jane, Jailza e Jeane, pela força nos reverses e alegrias que vivi.

Ao meu irmão Gilvânio, meu “Nininho”, sempre presente em minha vida.

Aos meus “irmãos” Marcela Haydée, José Pedro e João Rafael, “quase filhos” que a vida me deu e com quem vivi a intensidade maior de ser, viver e vencer.

A José Pedro, pelo exemplo de superação.

A João Rafael, meu afilhado, por aumentar em mim o sentimento do amor verdadeiro.

À Marcela Haydée, meu exemplo de determinação e inspiração na luta para alcançar um objetivo, minha eterna admiração.

Amo vocês de verdade.

Aos meus amigos fiéis e inesquecíveis Eduardo, Rodrigo, Marcelo, Éwerton e Sérgio, parceiros de vida acadêmica. A luta foi grande, hein?

Rodrigo e Marcelo, vocês foram essenciais na elaboração deste TCC, sem esquecer de Silvana Gomes, sou eternamente grata.

A todos os professores, em especial ao Professor Josan Carvalho, que me mostrou a essência de ser um verdadeiro professor presente e dedicado, obrigada por me fazerem realmente aprender no verdadeiro sentido da palavra.

E, finalmente um agradecimento especial ao meu orientador, o Prof. Dr. Cláudio Borba, pelo imenso suporte no pouco tempo que lhe coube, por suas correções, incentivos e tempo disponível.

Muito Obrigada!

## **LISTA DE FIGURAS**

- Figura 1 - Evolução da temperatura com profundidade e gradiente geotérmico.
- Figura 2 - Exemplo de plotagem de Horner em um poço da Costa do Golfo.
- Figura 3 - Construção do perfil geotérmico de um poço.
- Figura 4 - Exemplo de registro de temperatura.
- Figura 5 - Ilustração das mudanças na temperatura do poço com o tempo.
- Figura 6 - Detecção da altura do cimento por trás do revestimento.
- Figura 7 - Exemplo de detecção de zonas produtoras de gás de um perfil de temperatura.
- Figura 8 - Exemplo da Califórnia mostrando dados de temperatura de 1994-2001 como curvas.
- Figura 9 - Mapa da bacia de Sergipe-Alagoas.
- Figura 10 - Mapa de localização do campo de Castanhal.
- Figura 11 - Perfil de temperatura e de raios gama de um poço de Castanhal.
- Figura 12 - Interpretação do perfil.
- Figura 13 - Esquema mostrando o aquecimento do reservatório pela injeção de vapor.
- Figura 14 - Perfil de Temperatura.
- Figura 15 - Relação entre viscosidade e temperatura para óleos.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Variação de temperatura de acordo a profundidade

## RESUMO

Na indústria do petróleo a geologia é responsável por analisar possíveis armazenamentos onde possam ser encontradas acumulações de hidrocarboneto. A perfilagem é uma das mais úteis e importante ferramenta disponível no setor petrolífero sendo utilizada quase sem exceção em todos os poços perfurados. Os perfis são responsáveis por identificar o reservatório produtor, aquífero, rocha selante, topo e a base dos reservatórios. Os perfis de temperatura permitem detectar mudanças no gradiente geotérmico normal de uma área, tendo grande aplicação em projetos de injeção de vapor. As medições de temperatura permitem a definição de mudanças no balanço geotérmico (energia geotérmica, fluxo térmico, maturação de matéria orgânica, etc.). Pode-se então definir a atividade geotérmica média de um poço ou de uma formação. Em reservatórios com óleo de alta viscosidade faz-se necessário o uso de injeção de vapor com o objetivo de diminuir a viscosidade e aumentar a vazão de produção. Neste trabalho foi avaliado, através da interpretação de um perfil de temperatura, o efeito da injeção de vapor em um reservatório de Sergipe.

**Palavras Chaves:** Injeção de vapor, perfilagem, perfil de temperatura, viscosidade.

## **ABSTRACT**

In the oil industry, geology is responsible for analyzing possible storage sites where hydrocarbon accumulations can be found. Logging is one of the most useful and important tool available in the petroleum industry being used almost without exception in all drilled wells. The logs are responsible for identifying the reservoir producer, aquifer, sealing rock, top and the base of the reservoirs. The temperature logs allow detecting changes in the normal geothermal gradient of an area, having great application in steam injection projects. Temperature measurements allow the definition of changes in the geothermal balance (geothermal energy, thermal flow, maturation of organic matter, etc.). One can then define the average geothermal activity of a well or a formation. In reservoirs with high viscosity oil, it is necessary to use steam injection in order to reduce the viscosity and increase the production flow rate. In this work, the effect of the steam injection in a reservoir of Sergipe was evaluated through the interpretation of a temperature log.

**Key words:** Log, steam injection, temperature profile, viscosity.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
2.1 Perfilagem de Poços.....	12
2.2 Perfil Sônico .....	12
2.3 Perfil de Raios Gama .....	13
2.4 Perfil de Resistividade .....	13
2.5 Perfil Neutrônico.....	14
2.6 Perfil de Densidade .....	14
2.7 Perfil de Calibre (caliper) .....	15
<b>3. GRADIENTE DE TEMPERATURA .....</b>	<b>15</b>
3.1 Métodos de Medição de Temperatura em Poços .....	16
3.1.1 Medições pontuais durante e logo após a perfuração de poços .....	16
3.1.2. Transmissão da Medida de Temperatura .....	19
3.2. Medições contínuas de temperatura (perfis de temperatura) .....	20
<b>4. EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DO PERFIL DE TEMPERATURA .....</b>	<b>21</b>
4.1. Poço aberto .....	21
4.2. Poçorevestido .....	22
4.3. Poço com injeção de vapor .....	24
<b>5. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>25</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>32</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Na indústria do petróleo as áreas estudadas iniciam-se com a geologia e passam para a engenharia. Esses estudos servem para garantir a viabilidade econômica dos projetos. A geologia é a responsável por identificar possíveis armazenamentos onde possam ser encontradas acumulações de hidrocarbonetos. A engenharia de petróleo, entre outras coisas, é a responsável pela perfuração, completção, avaliação, produtividade da formação e previsão de produção dos reservatórios.

Uma das principais ferramentas para a avaliação de poços é a perfilagem, de onde podem ser obtidas diversas propriedades petrofísicas. Os principais perfis são: caliper, potencial espontâneo, resistividade, indução, raio gama, raio gama espectral, sônico, densidade, porosidade neutrônica e perfis com imagens sônicas e de resistividade, que servem para identificar as verdadeiras propriedades da formação. Outra propriedade que pode ser medida e utilizada na avaliação das formações é a temperatura, medida ao longo do poço com perfis de mesmo nome.

Sabe-se que a temperatura aumenta com a profundidade, devido ao gradiente geotérmico. Esse aumento da temperatura apresenta impacto nas características do reservatório e na estratégia de produção do poço.

Diante do exposto o presente trabalho tem como objetivo descrever os perfis, dando ênfase aos perfis de temperatura. Será realizado um estudo de caso mostrando aplicações desta ferramenta num campo de Castanhal submetido à injeção de vapor.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Perfilagem de Poços**

Segundo Lima (2005), a perfilagem é uma das mais úteis e importantes ferramentas disponíveis no setor petrolífero, sendo utilizada quase sem exceção em todos os poços perfurados. Nos casos mais extremos, seus custos não superam 5% do custo total de um poço. É através da perfilagem que se pode obter medidas contínuas, ao longo de um poço, de diferentes propriedades das formações. A partir da interpretação destas medidas, podem-se identificar zonas produtivas, distinguir óleo, gás ou água em um reservatório, e estimar a reserva de hidrocarbonetos, além de suas utilizações mais tradicionais na exploração, como correlação entre níveis estratigráficos, auxílio na confecção de mapas e calibração sísmica.

Através do deslocamento contínuo de sensores dentro do poço, as propriedades físicas das rochas são medidas. De acordo com Thomas (2004), o perfil de um poço é a imagem visual, em relação à profundidade, de uma ou mais propriedades das rochas (resistividade elétrica, potencial eletroquímico natural, tempo de trânsito de ondas mecânicas, radiatividade natural ou induzida, etc.).

O processo de perfilagem envolve um número de elementos, o primeiro é a ferramenta de medida, a sonda. Existem vários tipos de sondas de perfilagem que utilizam diferentes funções e geram diferentes informações. Algumas delas são ferramentas de medidas passivas, isto é, não geram um sinal. Outras exercem influência na formação, cuja propriedade ela está medindo. Estas medidas são transmitidas para a cabine laboratório, instalada em um caminhão, na superfície, por um cabo blindado, conhecido como “*wireline*” (ELLIS, 1987).

Os procedimentos para avaliação de um poço podem ser divididos em duas etapas: a primeira, realizada durante a perfuração do poço, através do estudo de amostra de calha e/ou de testemunhos; e a segunda, realizada após ou durante a perfuração do poço, através do estudo da perfilagem geofísica e dos testes de bombeamento ou vazão, para medir a capacidade de produção das camadas (NERY, 1997).

### **2.2 Perfil Sônico**

A ferramenta sônica consiste, basicamente, no registro do tempo decorrido entre o momento em que um pulso sonoro compressional que é emitido por um transmissor, montado em um mandril no interior do poço, até sua chegada a dois receptores distintos sobre o mesmo

mandril. A diferença entre os dois tempos de chegada (transmissor - receptor perto T-RP e transmissor - receptor longe T-RL) é chamada de tempo de trânsito ou *delay time* (DT) (LIMA, 2005).

A velocidade de propagação do som na rocha é dada pelo inverso do tempo necessário para que uma onda percorra a formação na distância de um pé (0,3048 m). É importante para se encontrar a curva de impedância acústica que é dada pela multiplicação da velocidade pela densidade. A partir dessa curva, consegue-se encontrar o coeficiente de refletividade que irá se convoluir com ondas compressoriais e gerar um sismograma sintético (traço sísmico). A formação desse traço será útil para fazer a amarração entre os registros da seção sísmica de superfície que é medido no domínio do tempo com as ferramentas de perfilagem que são medidas no domínio da profundidade (SANTOS, 2005).

Uma aplicação importante do perfil sônico é a determinação da porosidade de reservatórios.

### **2.3 Perfil de Raios Gama**

O perfil de raios gama ou GR mede a amplitude de um pulso radioativo, proveniente das rochas, sendo função da energia do fóton que penetra no detector. A intensidade desse pulso está relacionada com o número de fótons detectados por unidade de tempo. A interpretação de suas medidas merece atenção no sentido que a presença da radiação altera a sua resposta, como o caso dos arenitos monazíticos, que geram valores semelhantes ao dos folhelhos (LIMA, 2005).

Assim, o perfil de raios gama pode ser utilizado como um indicador qualitativo e quantitativo do conteúdo argiloso das rochas, desde que essa radioatividade dependa exclusivamente do teor de argilominerais presente. Rochas com grão feldspáticos (arcóseos) ou conglomerados polimíticos são as exceções a esta regra (NERY, 2013).

### **2.4 Perfil de Resistividade**

Medido em ohm-m, indica a habilidade de um material em resistir à condução elétrica, sendo o inverso da condutividade. A resistência das rochas irá depender de sua porosidade, da natureza do fluido contido em seus poros e do conteúdo de sal nele dissolvido. Com relação à natureza dos fluidos, hidrocarbonetos não são bons condutores elétricos, isto é, possuem uma alta resistividade, enquanto as águas da formação (água salgada) são boas

condutoras, possuindo assim uma baixa resistividade. Essa grande diferença entre a resistividade de rochas preenchidas por hidrocarbonetos e aquelas preenchidas por água da formação, torna o perfil resistividade muito importante na avaliação da saturação de fluidos das formações. Cabe ressaltar que, no caso da água doce, o perfil resistividade apresentará altos valores da mesma forma que apresenta na presença de hidrocarbonetos. Este efeito pode levar a interpretações erradas do fluido presente no reservatório (ROCHA, 2009).

Os perfis elétricos foram os primeiros métodos a serem usados dentro de poços na indústria do petróleo. De todas as propriedades da rocha medidas pelos diversos perfis, a resistividade elétrica é uma das mais importantes, por ser capaz de determinar a quantidade relativa de hidrocarbonetos na formação. De modo geral, alta resistividade indica a possível presença de óleo ou gás na formação, pois hidrocarbonetos não são bons condutores de eletricidade. Por outro lado, baixa resistividade indica presença de água, que provavelmente também estará presente entre os poros da rocha (SOUZA, 2013).

## **2.5 Perfil Neutrônico**

Foi a primeira ferramenta nuclear a ser utilizada para a obtenção de uma estimativa direta da porosidade da formação. Os nêutrons são partículas destituídas de carga elétrica, com massa quase idêntica à do núcleo de hidrogênio. Sendo partículas neutras, eles podem penetrar profundamente na matéria, atingindo os núcleos dos elementos que compõem a rocha, onde interagem elástica ou inelasticamente com eles. O princípio ferramental baseia-se no fato que o hidrogênio apresenta uma seção de choque relativamente grande e a massa pequena, sendo bastante eficiente no processo da redução da energia dos nêutrons rápidos. Uma medida da distribuição espacial dos nêutrons epitermais resultantes da interação dos nêutrons com a formação, dá uma noção do conteúdo de hidrogênio presente. Com este hidrogênio (na forma de água ou hidrocarboneto) está no interior do espaço poroso da formação, isto faz com que esta medida esteja diretamente relacionada ao valor da porosidade (MIRANDA, 2004).

## **2.6 Perfil de Densidade**

Detecta os raios gamas defletidos pelos elétrons orbitais dos elementos componentes das rochas, após terem sido emitidos por uma fonte colimada situada dentro do poço. A partir da medida da densidade das camadas, permite o cálculo da porosidade e a

identificação das zonas gás. É utilizado também como apoio a sísmica para o cálculo do sismograma sintético (THOMAS, 2004).

### **2.7 Perfil de Calibre (caliper)**

Mede o diâmetro do poço e nos fornece de forma indireta, uma indicação das condições de estabilidade do poço. Os *break-outs* (falha por cisalhamento) e os *washouts* (alargamento devido à interação da coluna com o poço com excesso de vazão) são exemplos de desabamentos ocorridos no poço e indicadas pelo perfil caliper. Por outro lado, formações “móveis” tipo alguns folhelhos e sais, podem gerar diâmetros menores que o diâmetro da broca usada para perfurar o poço, sendo também identificado pelo perfil caliper (ROCHA, 2009).

## **3. GRADIENTE DE TEMPERATURA**

Provavelmente, a primeira medição física feita em um poço de petróleo, com exceção da profundidade, foi a determinação da temperatura do fundo do poço. Tem havido contínuo interesse e especulação quanto à significância e utilidade dos dados de temperatura da subsuperfície durante o desenvolvimento da indústria do petróleo ao longo do século passado. O interesse na medição de temperatura é um resultado direto da correlação observada entre previsões teóricas anteriores e dados recentemente adquiridos com novos aparelhos altamente sensíveis e novos conceitos para gerar temperaturas profundas a serem medidas além dos gradientes que ocorrem naturalmente (ZALAN, 2003).

Geralmente a temperatura aumenta com a profundidade e, em condições não perturbadas, tem uma taxa de aumento com a profundidade conhecida como gradiente geotérmico (Figura 1). Esse gradiente varia de acordo com a localização geográfica e a condutividade térmica da formação. O gradiente é geralmente baixo em formações de alta condutividade térmica (sal ou anidrita, por exemplo) e elevado no caso oposto (por exemplo, folhelhos). A temperatura em um poço geralmente dependerá do gradiente geotérmico, exceto quando as mudanças de temperaturas ocorrerão devido à circulação de lamas de perfuração que resfriam a formação à medida que ela é perfurada. A transferência de calor no contato lama-rocha é por convecção, enquanto na própria formação é por condução. O efeito do resfriamento da lama no fundo do poço e o efeito de aquecimento mais alto no poço alterará o perfil de temperatura ao longo do poço e, conseqüentemente, do gradiente térmico original. Ao final da perfuração, a temperatura na parte inferior do poço se aproxima da temperatura inicial do fundo,

embora ainda haja uma diferença entre 10 e 20 °C (a circulação parou neste caso). Uma vez que a circulação de lama de perfuração tenha parado, a troca de calor de rocha para rocha, significa que haverá um aquecimento gradual da rocha até sua temperatura estável original. Isso dependerá da condutividade térmica da rocha, mas geralmente levará algum tempo (SERRA, 1984).

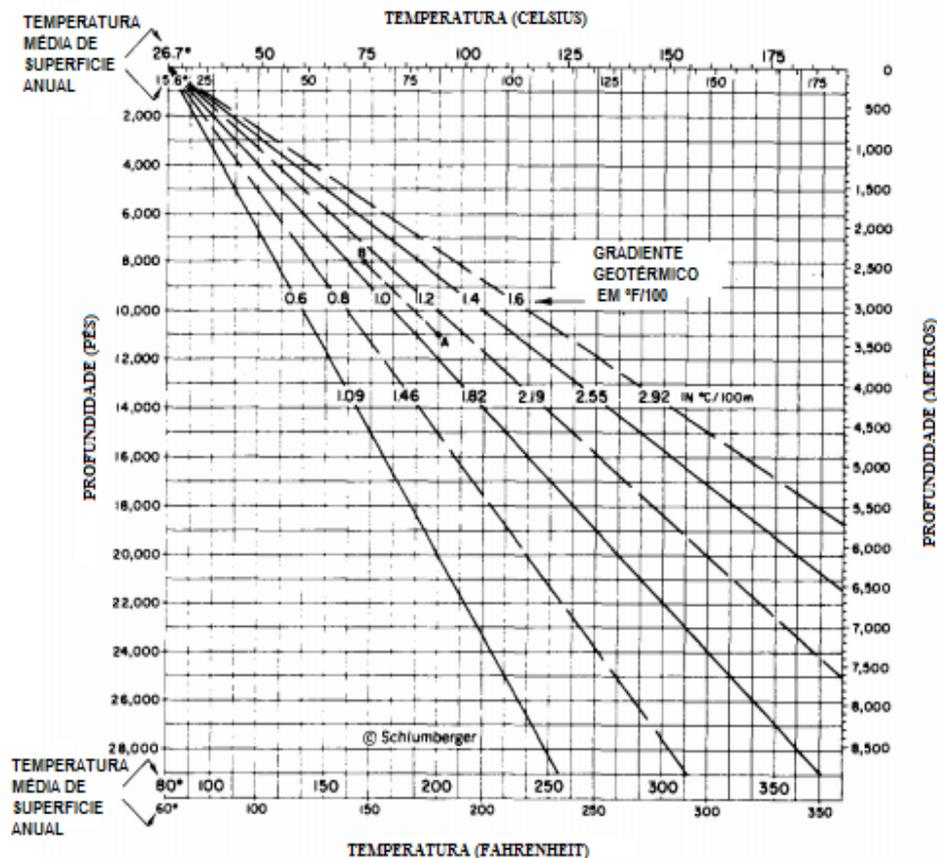


Figura1. Evolução da temperatura com profundidade e gradiente geotérmico (SERRA, 1984).

### 3.1 Métodos de Medição de Temperatura em Poços

#### 3.1.1 Medições pontuais durante e logo após a perfuração de poços

Durante a perfilagem, a ferramenta de registro executada no poço contém um termômetro de leitura máxima, que fornece uma leitura da temperatura na parte inferior do poço. A cada utilização da ferramenta, a temperatura é medida e um aumento na temperatura é observado com o tempo. Essa é a tendência de restaurar o equilíbrio e o fundo do poço retornar à sua temperatura original. A partir dessas medições, é possível extrapolar a temperatura inicial do solo na parte inferior do poço, usando um gráfico de temperatura de Horner.

Uso do método Horner supõe a coleta dos seguintes dados:

- Profundidade do fundo do poço;

- Tempo em que a perfuração cessou (dia, hora)
  - Tempo de parada da circulação da lama (dia, hora)
  - Taxa de penetração da broca durante o tempo necessário para perfurar o último metro (Tk1);
  - Tempo de circulação (Tk2) em minutos, dos últimos dez metros perfurados;
- $$T_k = T_{k1} + T_{k2}$$
- Tipo de ferramenta de registro,
  - Profundidade máxima atingida,
  - Tempo em que o registro começou a chegar (dia, hora, minuto);
  - Tempo entre o início do registro e a circulação parada;
  - Temperatura máxima registrada,

Embora dois pontos de temperatura-tempo sejam suficientes para desenhar a linha, segundo a equação:

$$T = k \cdot \log \frac{\Delta t + t_k}{\Delta t} = T(\infty)$$

É preferível ter pelo menos três ou quatro pontos para melhor definir uma reta. É por isso que um termômetro máximo é usado com cada ferramenta. O objetivo é obter a temperatura para um tempo infinito, no qual a temperatura estaria estabilizada. Como o termômetro requer várias leituras, são necessárias várias (ao menos duas) descidas da ferramenta de perfilagem.

No método de Horner as medidas são plotadas num gráfico semi-logarítmico. Na abscissa (eixo x)  $(\Delta t + t_k) / \Delta t$  é representado graficamente na escala logarítmica. Na ordenada (eixo y) a temperatura é plotada em uma escala linear. Os pontos plotados (Figura 2) permitem que uma linha seja desenhada. T, ou a temperatura de formação (Figura 3). Pode-se, então, juntando as temperaturas obtidas no fundo das diversas fases da perfuração, determinar um perfil geotérmico para o poço e, a partir desse, o gradiente geotérmico médio (em graus por cem metros ou pés) (SERRA, 1984).

Quando  $x = 1$ , que é para  $(\Delta t + t_k) / \Delta t = 1$ . De fato, neste caso, a equação é:

$$T = k \cdot \log \frac{\Delta t + t_k}{\Delta t} = T(\infty)$$

reduz-se a  $T = T(\infty)$ , que é a temperatura extrapolada para um tempo infinito, ou seja, a temperatura verdadeira da formação.

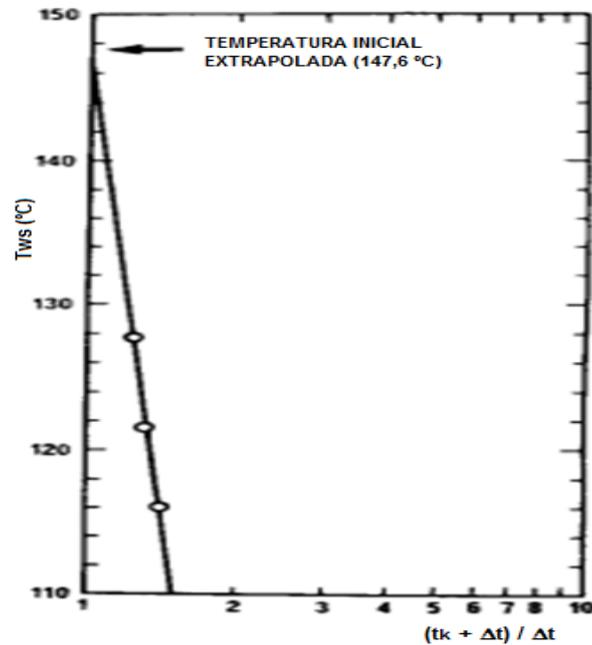


Figura 2 -Exemplo de plotagem de Horner em um poço da Costa do Golfo (SERRA, 1984).

Na Figura 3 pode-se obter o gradiente médio de temperatura, que é:  $GG = \Delta T / \Delta h = (100 - 8) / (2800 - 0) = 0,033 \text{ } ^\circ\text{C/m}$ .

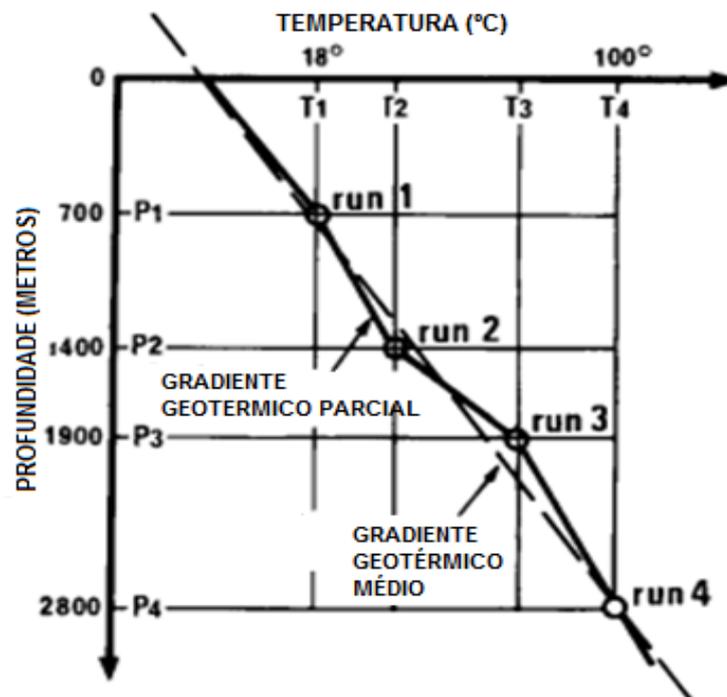


Figura 3 - Construção do perfil geotérmico de um poço. Neste caso, foi obtido um gradiente geotérmico de  $0,033 \text{ } ^\circ\text{C/m}$  (SERRA, 1984).

### 3.1.2 Transmissão da Medida de Temperatura

Em geral, os sistemas de medição de temperatura usados em poços podem ser agrupados em duas categorias. (I) Aqueles que são operados em tubos rígidos e não comunicam dados para a superfície durante a operação, e (II) aqueles que operam com cabos condutores para produzir gravação na superfície de medições contínuas de temperatura no fundo do poço.

#### I. Tipos de Linhas Sólidas

São utilizados termômetro de Mercúrio, onde a temperatura máxima do mercúrio é o dispositivo mais simples nesta categoria. Provavelmente foi o primeiro tipo de medição feita em poços e ainda é amplamente usado onde apenas as determinações da temperatura do inferior do poço são necessárias.

O termômetro de registro mecânico de fundo de poço é um unidade integrada, que realiza as funções de medição de temperatura e registro dentro da ferramenta de fundo. Um sistema preenchido com gás detecta a variação de temperatura e desloca mecanicamente uma caneta que grava em uma carta acionada por relógio. A correlação entre a temperatura e a profundidade é realizada pelo operador na superfície, que deve correlacionar as posições de profundidade conhecidas com o tempo. Este dispositivo é muito útil em muitas aplicações, mas tem a desvantagem de oferecer apenas dados localizados em vez de contínuos.

#### II. Tipos de linha de condutor.

Fios de Resistência podem realizar registros de temperatura, que utiliza um metal como a platina no fundo do poço para detectar a temperatura e ligado ao cabo condutor à superfície para uma gravação contínua na superfície, produz os dados mais completos sobre as temperaturas do fundo do poço. O sensor de fio de resistência é bastante rápido e permite taxas de registro de até 1000 pés / hora. sem perda de precisão.

Os semi-condutores são um desenvolvimento mais recente que substituiu o sensor de fio de resistência por um elemento coeficiente negativo, semi-condutor e com várias vantagens. O elemento semi-condutor experimenta uma porcentagem muito maior de mudança de resistência por variação de temperatura do que o fio de resistência e, portanto, aumenta muito a sensibilidade do sistema de registro. Sua massa relativamente pequena também reduz o atraso térmico e permite taxas de registro de até 6.000 pés/hora. O tamanho pequeno do elemento

também tornou possível o desenvolvimento de ferramentas de fundo de poço com apenas 3/4 de polegada de diâmetro para poços de pequeno diâmetro (ZALAN, 2003).

### 3.2 Medições contínuas de temperatura (perfis de temperatura)

Ao contrário dos métodos anteriores, a perfilagem de temperatura permite a medida contínua desta propriedade ao longo do poço (Figura 4).

Estes são feitos usando um termômetro cujo elemento consiste de um resistor de metal sensível à temperatura, cuja resistividade muda com a temperatura. O metal é uma liga à prova de corrosão que tem uma resposta linear na faixa de temperatura normal (0 a 350 °F), uma constante de tempo baixa e um efeito Joule baixo (ou efeito de aquecimento) devido à corrente de medição. Ao contrário de outros perfis, o registro de temperatura é geralmente feito ao descer no poço para não perturbar o equilíbrio térmico agitando a lama com o movimento da sonda e do cabo (SERRA, 1984).

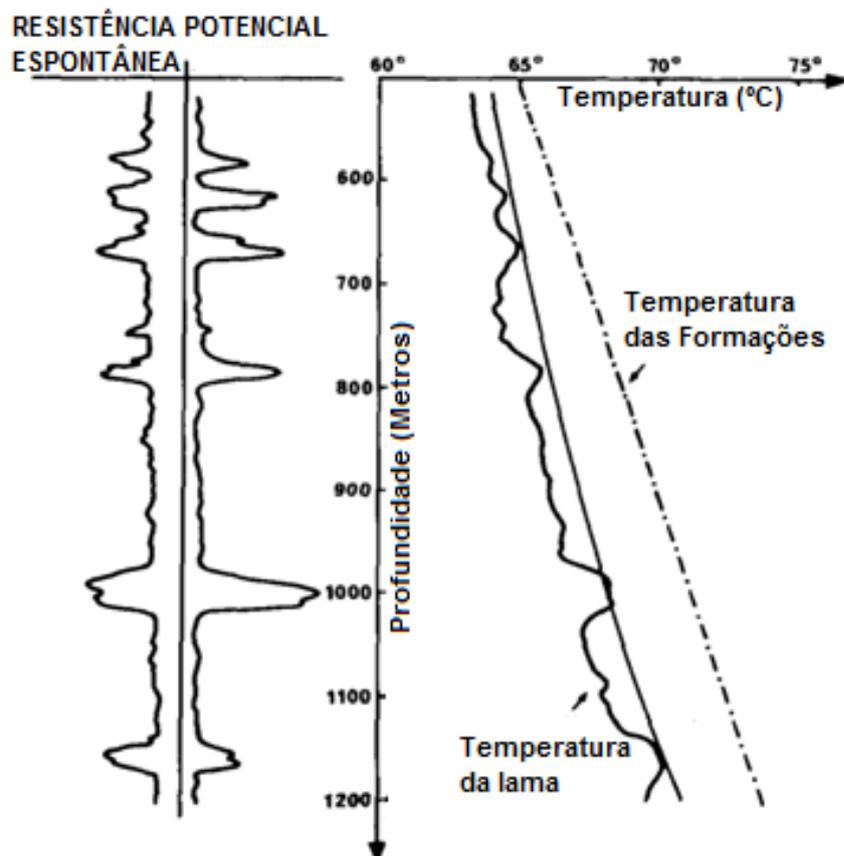


Figura 4 - Exemplo de registro de temperatura (Guyod, 1946)

## 4. EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DO PERFIL DE TEMPERATURA

### 4.1 Poço aberto

As medições de temperatura permitem a definição de mudanças no balanço geotérmico (energia geotérmica, fluxo térmico, maturação de matéria orgânica, etc.). Pode-se então definir a atividade geotérmica média de um poço ou de uma formação. O equilíbrio térmico destruído pela perfuração se restabelece mais ou menos rapidamente de acordo com a condutividade térmica da rocha (Figura 5). Variações na temperatura podem dar alguma indicação de litologia. Esta é uma maneira de detectar folhelhos compactados (a temperatura sobe mais rapidamente, o gradiente geotérmico aumenta, pois são bons condutores de calor). Podem-se localizar zonas de perda de pressão. Por outro lado, pode-se detectar o fluxo de fluidos, em particular, gás, que é detectado pelo efeito de resfriamento causado pela expansão do gás (SERRA, 1984).

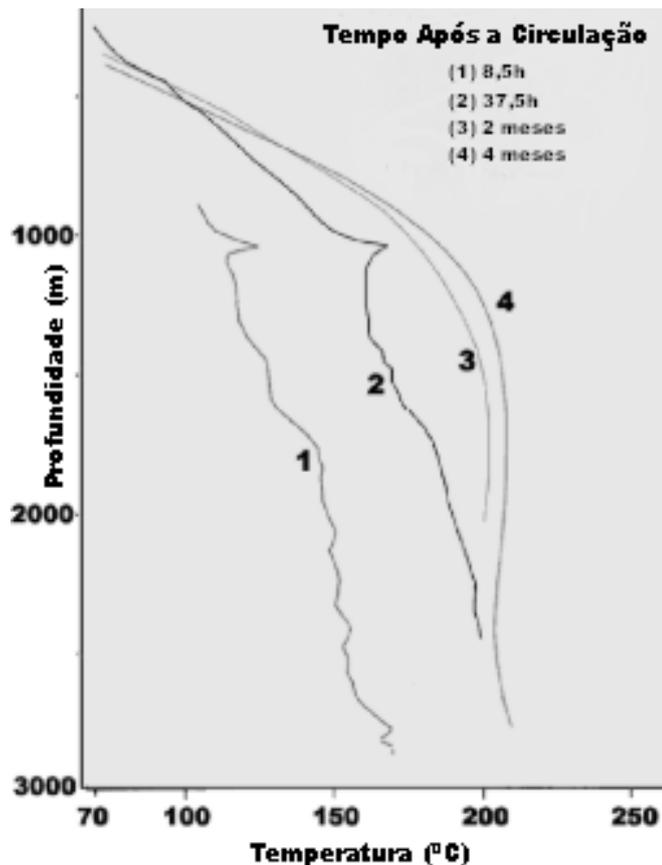


Figura 5 - Ilustração das mudanças na temperatura do poço com o tempo. O equilíbrio só é restabelecido quatro meses após a parada da circulação (adaptado de Benoit et al, 1980).

## 4.2 Poço revestido

Segundo Serra (1984), as principais aplicações dos registros de temperatura são os poços revestidos e, em particular, o registro de produção:

- (a) detecção da altura do cimento atrás do revestimento (Figura 6) e das zonas de canalização (circulação de fluido por atrás do revestimento);
- (b) detecção de zonas produtoras (Figura 7);
- (c) determinação da profundidade do ponto de bolha;
- (d) detecção de zonas de entrada de injeção de fluido.

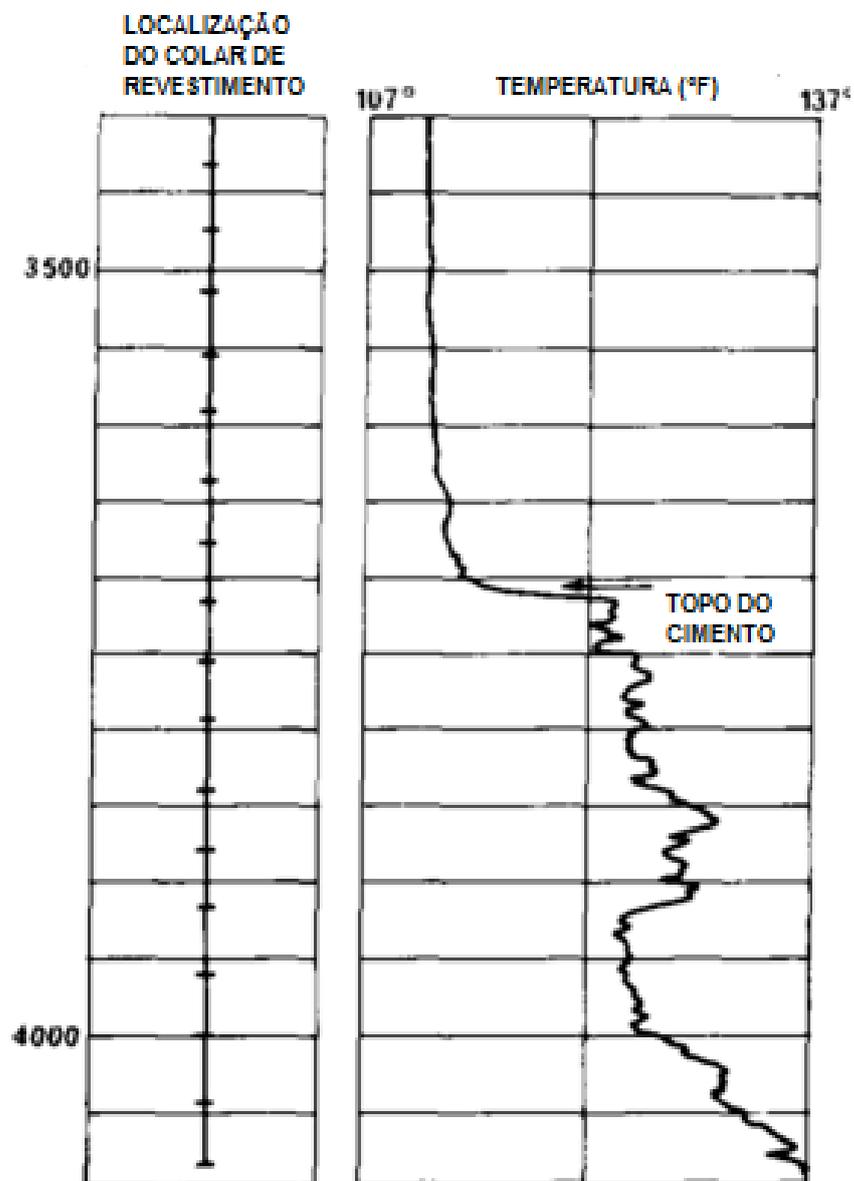


Figura 6 - Detecção da altura do cimento por trás do revestimento (Schlumberger, 1989).

De acordo com o perfil de temperatura apresentado na figura acima, nota-se que na profundidade de 3700 metros ocorreu um aumento substancial da temperatura por trás do revestimento, sendo assim determinado o topo do cimento.

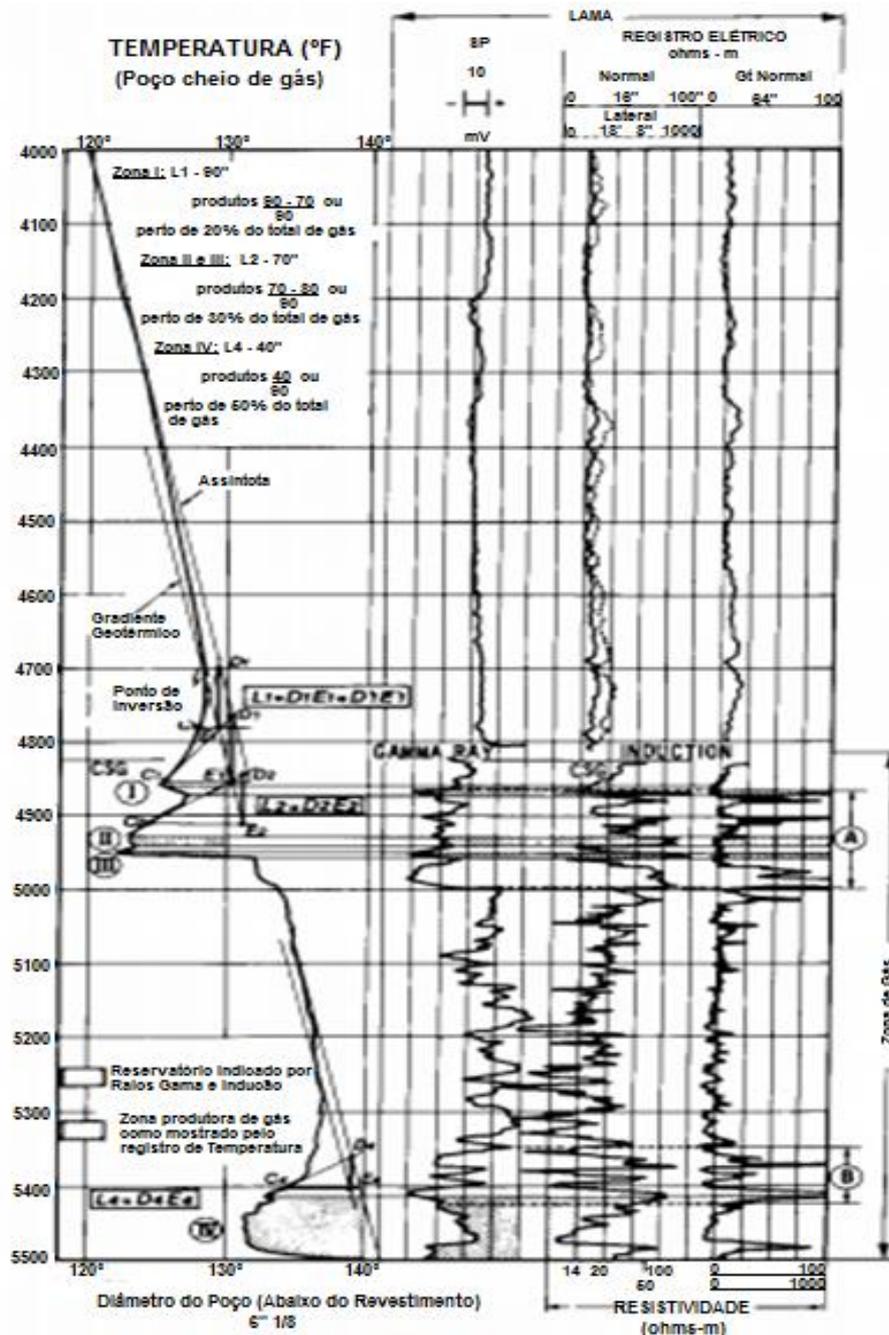


Figura 7 - Exemplo de detecção de zonas produtoras de gás de um perfil de temperatura (Tixier, 1955).

Devido à temperatura na zona produtora ter sido menor do que a esperada pelo gradiente. Houve uma queda de temperatura em relação ao gradiente geotérmica, produzida pela produção de gás (a decompressão do gás produz resfriamento).

### 4.3 Poço com injeção de vapor

A Figura 8 é um exemplo de um poço na Califórnia que mostra dados de temperatura de 1994-2001 como curvas. E também representa dados de temperatura como uma interpolação temporal (mostrada à direita da figura 8), com o tempo aumentando para a direita, neste caso indicando crescimento de uma caixa de vapor ao longo do tempo.

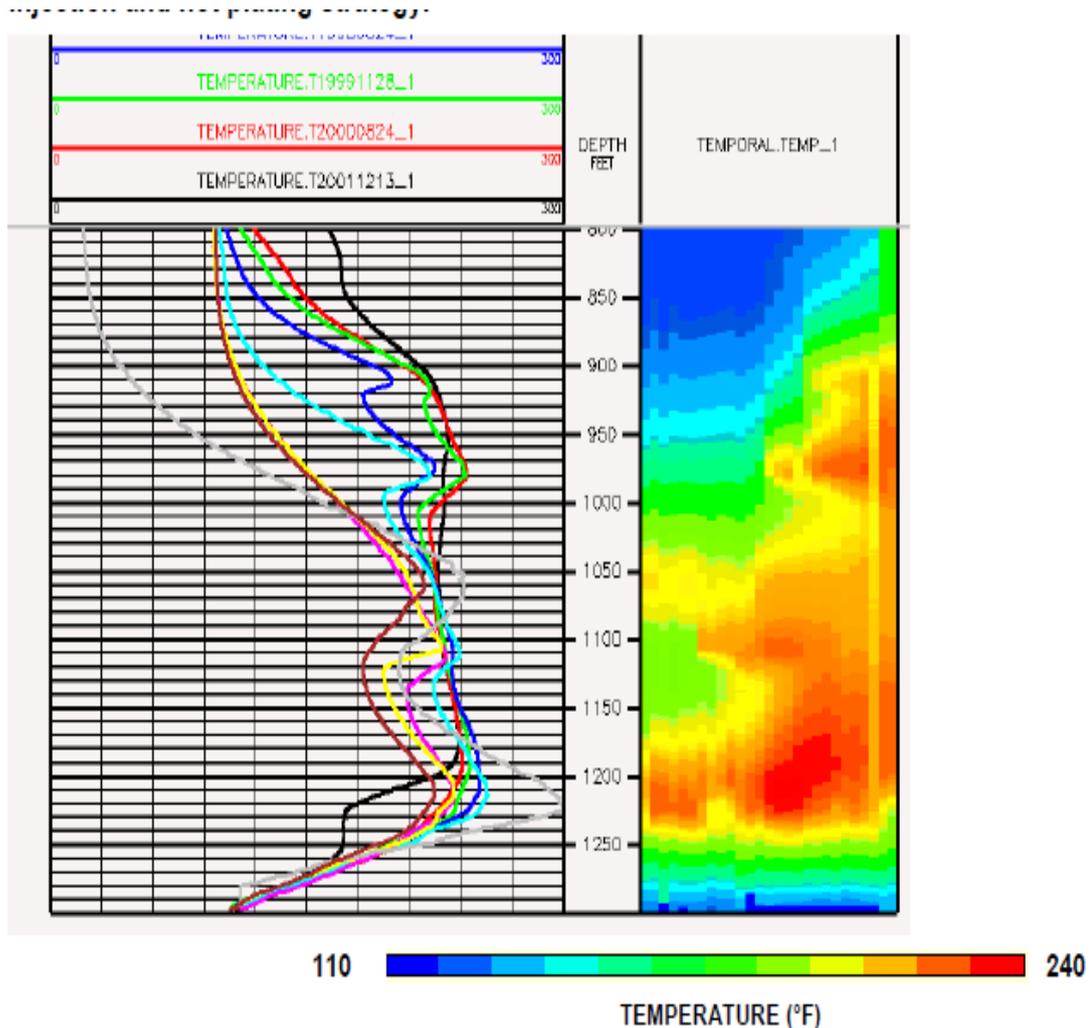


Figura 8 - Exemplo da Califórnia mostrando dados de temperatura de 1994-2001 como curvas. O registro de temperatura fornece informações diretas sobre a distribuição de calor. Mas, não mostra diretamente as alterações na saturação (ZALAN, 2003).

Esta figura mostra uma superposição de perfis de temperatura corridos em diversos intervalos de tempo, em um poço situado num campo submetido à injeção de vapor. Com isso, deu para perceber a evolução da frente de vapor ao longo do tempo, e, portanto, saber onde o vapor está fazendo efeito.

## 5. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso apresenta a aplicação do perfil de temperatura na monitoração da injeção de vapor em um reservatório da Bacia de Sergipe-Alagoas.

A Bacia Sergipe–Alagoas situa-se na margem continental do nordeste brasileiro, cobrindo cerca de 35.000 km<sup>2</sup>, dos quais dois terços estão em sua porção marítima (Figura 9). De todas as bacias da margem continental brasileira, esta é a que registra a sucessão estratigráfica mais completa. Os primeiros trabalhos exploratórios na bacia datam da década de 40. Atualmente, os domínios de terra e de águas rasas da Bacia Sergipe-Alagoas constituem província petrolífera em avançado estágio exploratório. A reserva atual da bacia inclui 40 milhões de m<sup>3</sup> de óleo e 11,5 bilhões de m<sup>3</sup> de gás (ANP, 2001).



Figura 9 – Mapa da bacia de Sergipe-Alagoas (ANP, 2001)

Até junho de 2015 foram perfurados 5.652 poços (4.722 na Sub-bacia de Sergipe e 930 na Sub-bacia de Alagoas) sendo 1.154 poços exploratórios, (788 em Sergipe e 366 em Alagoas) e 4.498 poços de desenvolvimento (3.934 em Sergipe e 564 em Alagoas) (ANP, 2015).

Diversos campos são submetidos à injeção de fluidos. Alguns reservatórios produtores de óleo pesado estão submetidos à injeção de vapor.

- Campo de Castanhal

O Campo de Castanhal localiza-se na Bacia Sergipe/Alagoas, a cerca de 20 km da cidade de Carmópolis e ao norte do Campo de Siririzinho, possui área de 8,619 km<sup>2</sup> (ANP,2016).

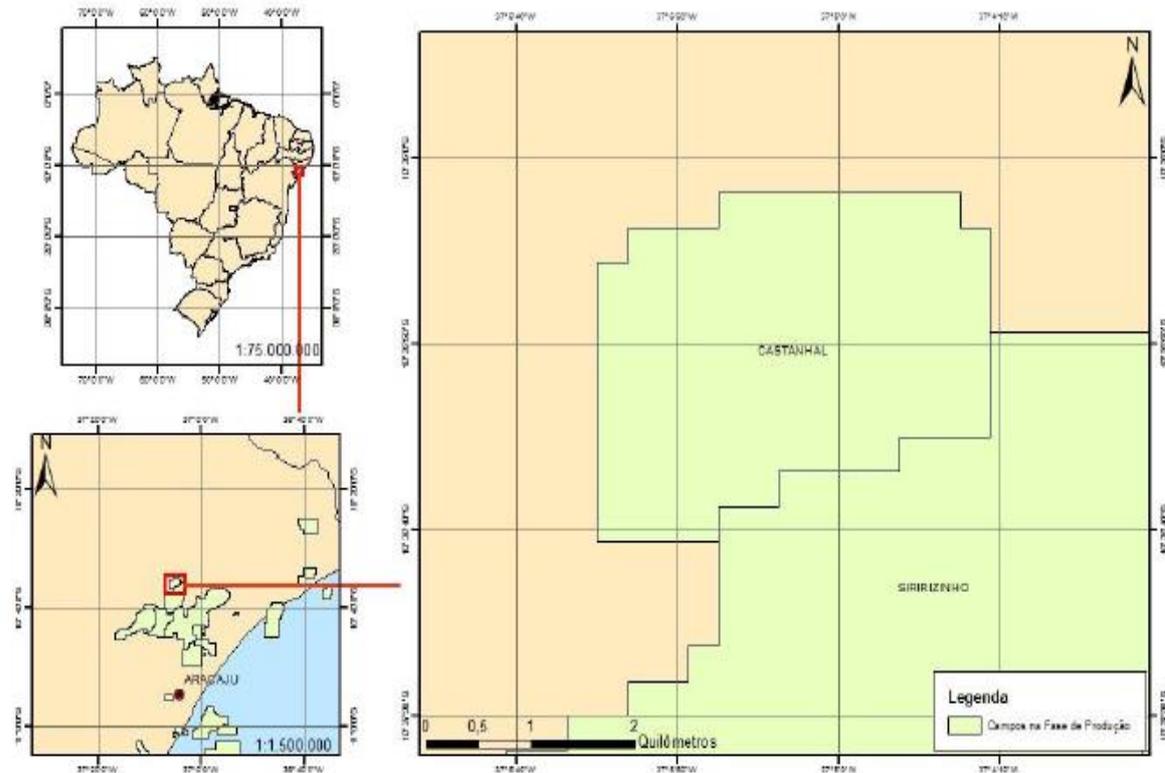


Figura 10 – Mapa de localização do campo de Castanhal (ANP, 2016).

Os reservatórios são arenitos finos a conglomeráticos inconsolidados com alta permo-porosidade, da Formação Muribeca, Membro Carmópolis. O óleo é biodegradado, de alta viscosidade (entre 1000 e 9000 cp) e °API entre 10 e 18, e está distribuído em quatro zonas: MUR/CPS-1, 2, 3 e 4. O mecanismo de produção dos reservatórios é de gás em solução. A injeção de vapor ocorre nas Zonas CPS-2 e CPS-3, que é seletiva e simultânea com a utilização do *steamsaver*. No início dos projetos de injeção de vapor é feito através de injeção cíclica. Com o decorrer do tempo após a implantação contínua os poços produtores que tiverem frios são ciclados sem intervenção de sonda (ANP, 2016).

Através do perfil temperatura corrido em um poço (Figura 11), foram analisados os dados necessários para que seja comprovada a injeção de vapor no reservatório.

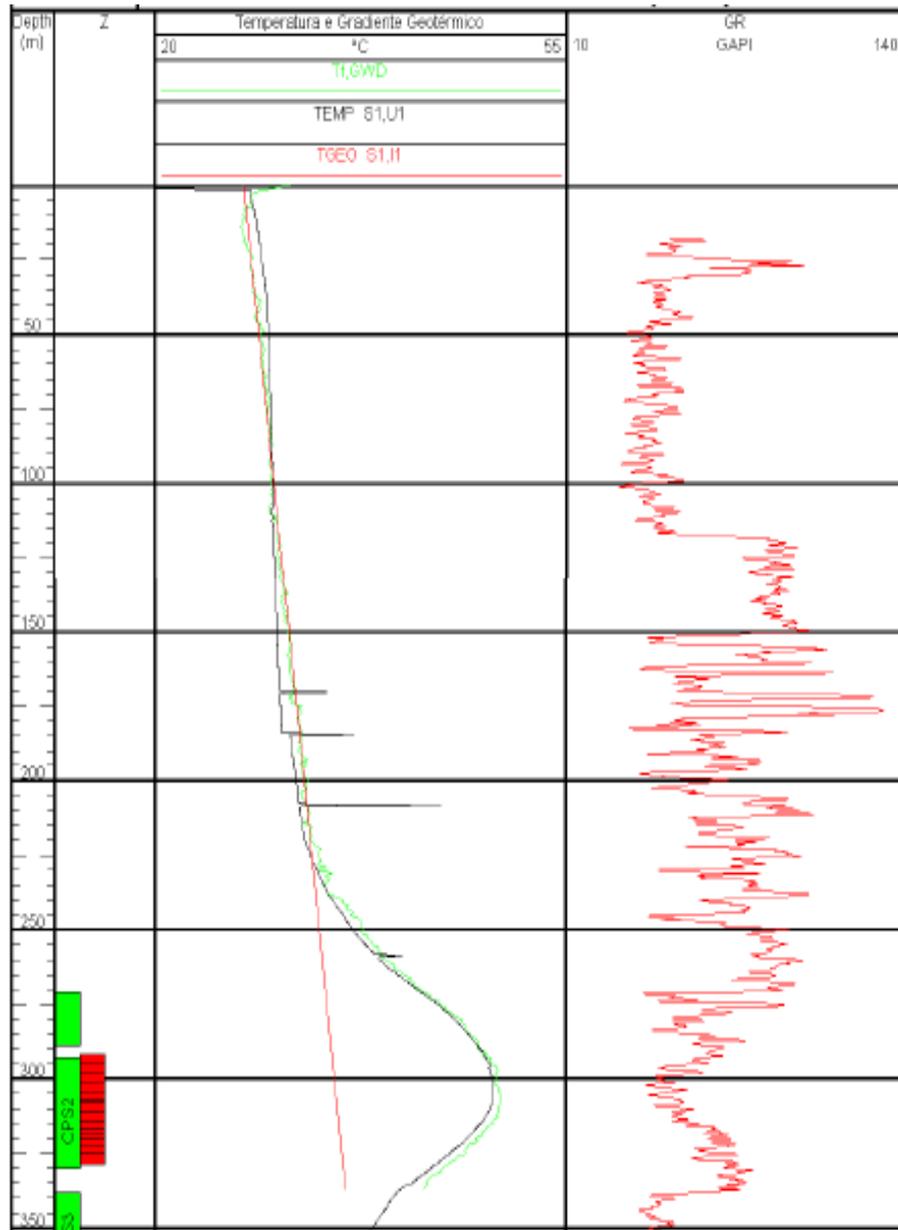


Figura 11 – Perfil de temperatura e de raios gama de um poço de Castanhal. A reta vermelha no perfil de temperatura indica o gradiente normal (natural), e as curvas verde e preta indicam temperaturas medidas pela ferramenta de perfuração.

Com o auxílio do programa *GetData Graph Digitizer*, foram recuperados os dados que permitiram a manipulação das informações em planilha eletrônica e a plotagem de um gráfico (Figura 12) onde pode-se identificar o reservatório produtor, um aquífero, a rocha selante, o topo e a base do reservatório e a área onde foi injetado o vapor. Com o perfil raios gama identificam-se os tipos de rochas, onde, os arenitos estão marcados na cor amarela e os folhelhos na cor verde.

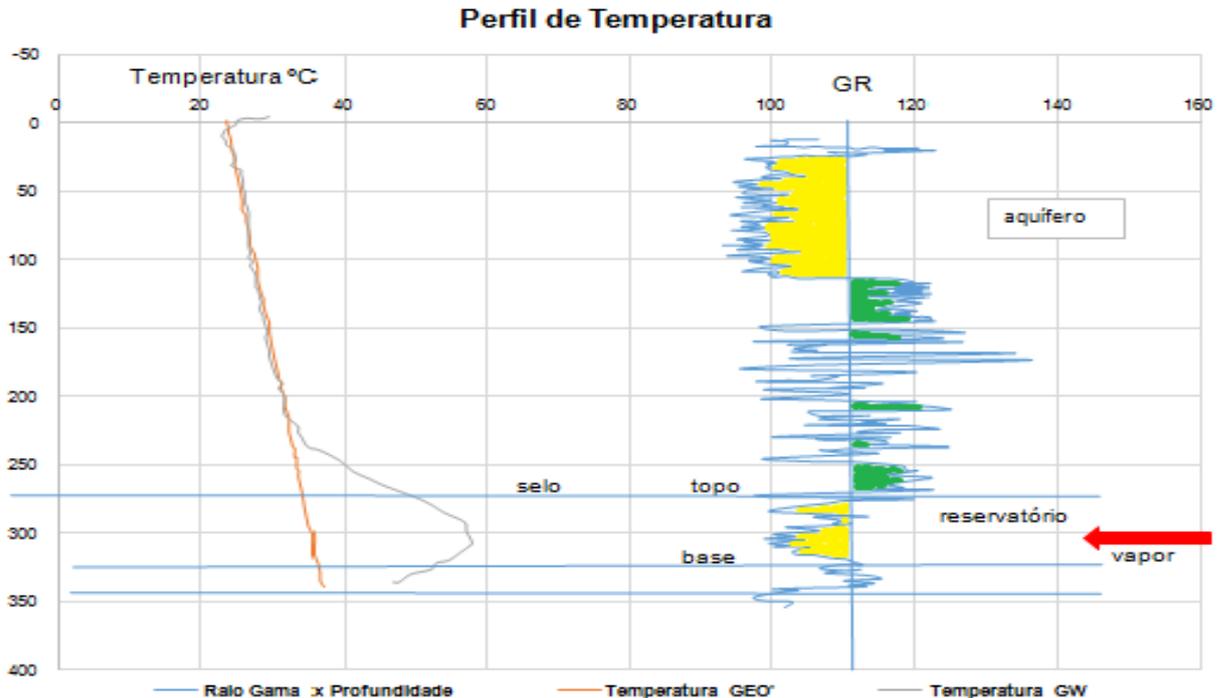


Figura 12–Interpretação do perfil de temperatura e de raios gama.

Na profundidade de aproximadamente 25 metros, observa-se a presença de um arenito com espessura de 95 metros. O baixo valor de raios gama sugere ser um arenito limpo, e por se tratar de uma profundidade baixa, deduz-se que se trata de reservatório de água, ou seja, um aquífero que deve ser preservado de qualquer tipo de contaminação decorrente da injeção ou produção de fluidos.

Abaixo do aquífero observa-se a presença camadas de folhelhos com espessuras de até 50 metros. São rochas que por terem o tamanho dos seus grãos muito finos são impermeáveis, e se tornam uma importante rocha selante para o acumulo de hidrocarbonetos.

Logo abaixo dos folhelhos, na profundidade de 275 metros, existe a presença de um arenito com espessura de cerca de 50 metros. Ao analisar o perfil de raios gama, com baixo valor identifica-se a presença do reservatório de hidrocarbonetos. Este reservatório está submetido á injeção de vapor, por outro poço situado a cerca de 100m de distância.

Devido ao óleo do reservatório ter alta viscosidade torna-se necessária a injeção de vapor a 180°C, para que essa viscosidade seja diminuída e o hidrocarboneto possa fluir até a superfície e possa ser produzido. A figura 13 é um esquema de como a injeção de vapor aumenta a temperatura do reservatório tornando o hidrocarboneto menos viscoso, facilitando sua fluidez em direção ao poço produtor.



Figura 13–Esquema mostrando o aquecimento do reservatório pela injeção de vapor. A seta indica a direção de fluxo de fluidos.

O perfil de temperatura (Figura 12) mostra duas curvas, a do gradiente geotérmico natural da área (curva vermelha) e a do gradiente geotérmico medido após a injeção de vapor no poço (curva cinza).

$$\frac{T2 - T1}{Prof2 - Prof1} = \text{Gradiente Geotérmico}$$

Com os valores de temperatura e profundidade é calculado o gradiente geotérmico que indica a taxa de variação de temperatura de um ponto ao outro.

Através do perfil de temperatura (Figura 14) observa-se o trecho do poço produtor influenciado pela injeção de vapor. Observa-se a propagação de calor através do poço injetor, para o poço produtor na zona reservatório.

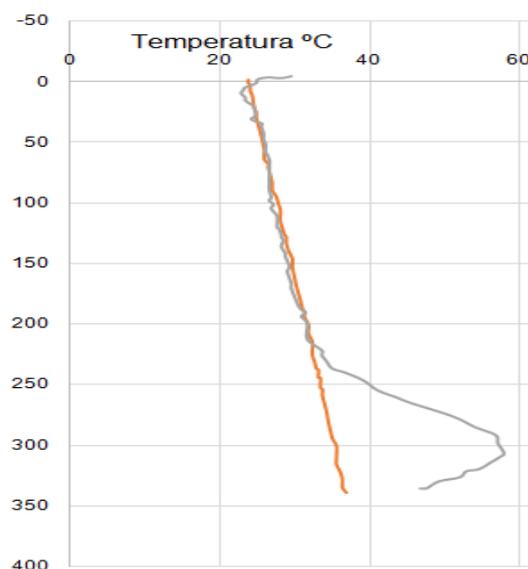


Figura 14 – Perfil de Temperatura

Ao correlacionar a temperatura esperada (baseada no gradiente geotérmico natural da área) com a temperatura medida, nota-se que a partir da profundidade de 225 metros há um aumento de temperatura, ainda fora do reservatório. Já na profundidade de 340 metros, houve uma queda de temperatura onde percebe-se que o calor passa a ser dissipado. Há um aumento da temperatura no reservatório, mostrando que a injeção de vapor está fazendo efeito. A temperatura aumentou de 51 para 57 graus Celsius, conforme mostra a tabela abaixo.

Tabela 1: Variação da temperatura de acordo com a profundidade

CAMADA	PROFUNDIDADE (m)	TEMPERATURA (K)	GRADIENTE GEOTÉRMICO (°C/m)
<b>Aquífero</b>	25 a 110	298 a 301	0,035
<b>Camada Intercalada</b>	110 a 250	301 a 313	0,038
<b>Camada Selante</b>	250 a 277	313 a 323	0,37
<b>Reservatório</b>	277 a 290	323 a 330	0,53
<b>Folhelho</b>	290 a 345	330 a 320	-0,18

O aquecimento do reservatório mostra que a viscosidade pode ter diminuído de 3000 para 800 mD, isso significa um ganho de 3,7 vezes na vazão de óleo do poço (Figura 14), já que, conforme a Lei de Darcy\*, a vazão é inversamente proporcional à viscosidade do fluido que percorre um meio poroso.

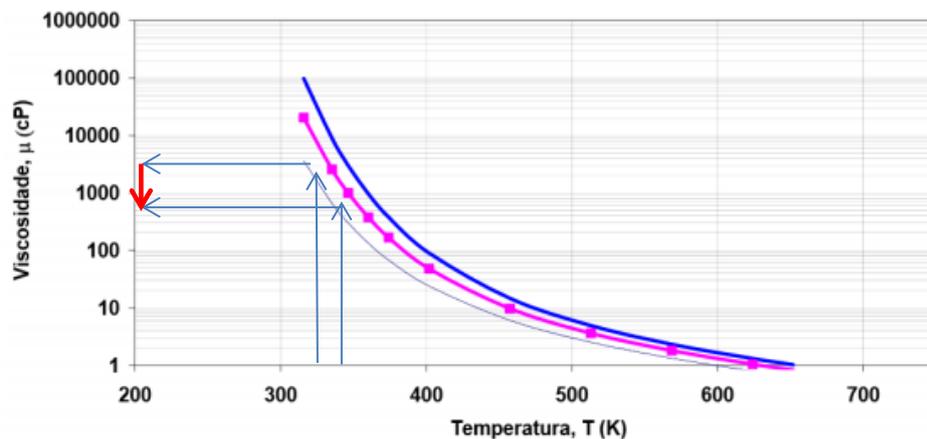


Figura 15: Relação entre viscosidade e temperatura para óleos (Queiroz, 2006.). As setas mostram o efeito do aumento da temperatura na queda da viscosidade do óleo no reservatório estudado.

Há uma condução do calor para as camadas selantes (folhelhos), mas que é dissipada. O aquecimento fica distante da camada do aquífero, o que mostra a segurança da operação.

$$*Q = \frac{2\pi * K * h * (P_e - P_w)}{\mu * \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}$$

## 6. CONCLUSÃO

No desenvolvimento desse trabalho houve a possibilidade de analisar o perfil do poço de castanhal através do perfil de temperatura, a eficiência da injeção de vapor e como passa a se comportar o reservatório após feita a injeção.

Em poços com alta viscosidade, a injeção de vapor faz com que esse óleo muito viscoso seja aquecido para assim diminuir sua viscosidade e aumentar a vazão de produção no poço desejado. Após o começo da introdução de vapor no campo de castanhal, alguns indícios dão conta que a injeção está sendo eficiente, nos perfis de temperatura o gradiente geotérmico natural em comparação com o gradiente medido após a injeção mostra que a temperatura aumentou de 35 para 57°C. Com a análise da Figura 14 em que relaciona a viscosidade com a temperatura, observa-se que a viscosidade que inicialmente era de 3000 cP com a injeção de vapor passou a ser de 800 cP e assim houve um ganho de 3,7 vezes na vazão da produção.

Esse estudo é de fundamental importância para a área da engenharia de petróleo, porque possibilita um entendimento mais aprofundado e de forma mais detalhada para situações que podem e devem ocorrer ao longo da profissão.

## 7. REFERÊNCIAS

- ANP, Plano de Desenvolvimento. Disponível em: <[www.anp.gov.br/images/planos\\_desenvolvimento/Castanhal.pdf](http://www.anp.gov.br/images/planos_desenvolvimento/Castanhal.pdf)>. Acesso em: 21/10/2018.
- ANP, Recursos minerais e energéticos: Petróleo. Disponível em: <[www.cprm.gov.br/publique/media/recursos\\_minerais/livro\\_geo\\_tec.../capX\\_b.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/recursos_minerais/livro_geo_tec.../capX_b.pdf)>. Acesso em: 15/09/2018
- BENOIT, W.R. et al. (1980), - Geothermal well log analysis at Desert Peak, Nevada.SPWLA, 21° ann. Log.Symp.Trans, papaer AA.
- ELLIS, D. V., 1987 – Well Logging for Earth Scientists – New York, Elsevier Science Publishing Co., Inc..532 p.
- Guyod, H., 1946. Temperature well logging. Oil Weekly, Oct. 21 +28, Nov. 4+ 11, Dec. 2, 9+ 16.
- Kunz, K.S. and Tixier, M.P., 1955. Temperature surveys in gas producing wells. J. Pet. Technol.
- LIMA, K. T. P. de. Utilização de Métodos Sísmicos, Perfilagem e Testemunho de Poços para Caracterização dos Turbiditos da Formação Urucutuca na Bacia de Almada (BA). UENF, Macaé-RJ. 2005.
- MIRANDA, A. I. F., Imageamento da Porosidade Através de Perfis Geofísicos de Poço. Tese de D.Sc., Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém,Pará, Brasil, 2004.
- NERY, G. G., 1997 – Perfilagem Geofísica Aplicada a Água Subterrânea. In: Feitosa, F.A.C. & Manoel Filho, J., Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações - Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 412 p, cap. 10.
- Nery, G. G. (2013) Perfilagem geofísica em poço aberto: fundamentos básicos com ênfase em petróleo. Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, RJ.
- QUEIROZ, G. O. Otimização da Injeção Cíclica de Vapor em Reservatórios de Óleo Pesado. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2006
- ROCHA, L. A. S., 2009 – Projetos de Poços de Petróleo. –Rio de Janeiro :Interciência: PETROBRAS.

SANTOS, A. C.; DE HIDROQUÍMICA, A. Noções. Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações. Organização e Coordenação Científica Fernando AC Feitosa, João Manoel Filho, Edilton Carneiro Feitosa, J. Geilson A. Demétrio 3ª. Edição-Revisada e Ampliada, CPRM Serviço Geológico do Brasil/LABHID, p. 325-357, 2008.

SANTOS, D. M. N. E. Análises de Regressão para Estimativas de Tempos de Trânsito Sintéticos. Monografia de graduação. São Cristóvão. 2005.

Schlumberger (1989) - CasedHole Log Interpretation - Principles/Applications. SMP-7025

SERRA, O. 1984. -Fundamentals of well-log interpretation - 2. The interpretation of logging data, developments in petroleum science (15B), Elsevier Science Publishers B.V., 1986a

SOUZA, L . G. Teoria E Interpretação da Perfilagem de Indução Triaxial. Monografia de Graduação. Niterói-RJ. 2013.

THOMAS, J. E.,2004 - Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2ª Ed. – Rio de Janeiro :Interciência : PETROBRAS.

ZALAN, Thomas A. et al. Steamflood Surveillance in Sumatra, Indonesia and San Joaquin Valley, California Using Steam Identification, Carbon/Oxygen, and Temperature Logs. In: SPE:80435. Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition.Society of Petroleum Engineers, 2003.