



Construção de um perfilador de temperatura de precisão e sua aplicação em poços tubulares do sítio controlado SCGR do IAG-USP

Francisco Yukio Hiodo¹, Nilton Silva¹, Jorge Luis Porsani¹, Welitom Rodrigues Borges², Tereza H. Yamabe¹, Carlos Alberto Birelli³

- 1- Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas USP - IAG-USP
- 2- Universidade de Brasília - UnB
- 3- Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 14 a 17 de novembro de 2010. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IV SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Abstract

A temperature logging equipment was developed for continuous geothermal measurement. The temperature probe carrying an interchangeable negative temperature coefficient (NTC) thermistor are linked to a 22 bits resolution ADC delta-sigma converter in surface by a long three wire lead. The ADC converter used was a MCP3551 device controlled by a fast 16 bit digital signal processor (DSP) dsPIC30F4013 microcontroller. After 12 sequential measurements in each probe position, a corrected mean value of NTC resistance is calculated and displayed. The probe depth resolution of 10 cm is given by a sheaver made with a small magnet and Hall magnetic sensors. The probe calibration curve for resistance versus temperature was determined in laboratory by using a ultra stabilized thermostatic bath. The best fit of each pair R-T with accuracy of $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$, is made by Steinhart and Hart equation. Measurements with accuracy better than $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ were made in two boreholes inside Shallow Geophysical Controlled Site (SCGR) from IAGUSP, that confirmed presence of two layers with freshwater in spite of the boreholes were protected by PVC pipe. Results are coherent with well lithologic profiles and with geoelectrical models.

Geologia Local

A área em estudo está localizada sobre os sedimentos de idade Terciária, cujos depósitos ocorreram diretamente sobre o embasamento do Complexo Cristalino Brasileiro, que em São Paulo tem seu maior desenvolvimento na faixa litorânea originando a Serra do Mar e parte da Serra da Mantiqueira. É constituído por rochas do período Pré-Cambriano, formados por granitos, gnaisses, micaxistos, quartzitos e calcários. No estado de São Paulo encontra-se duas bacias terciárias: a de Taubaté e a de São Paulo, situada no trecho médio do alto Tietê. Litologicamente é formada por argilas, siltes e areias argilosas, que foram distribuídas de forma alternadas, sucessivas e descontínuas.

A área de pesquisa encontra-se na porção centro-oeste do município de São Paulo, na margem

esquerda do Rio Pinheiros, dentro do campus da Universidade de São Paulo.

Os dois poços perfilados, distanciados de 15 metros, estão situados defronte ao prédio do IAG, e foram perfurados para complementar resultados provenientes de outras metodologias geofísicas aplicadas no Sítio Controlado da Geofísica Rasa do IAGUSP (SCGR).

Os objetivos desta pesquisa foram caracterizar geofisicamente os sedimentos e o topo rochoso granito-gnáissico na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo e, desenvolver instrumental científico de qualidade.

Instrumentação

O propósito principal desta pesquisa foi o desenvolvimento de um perfilador geotérmico de baixo custo, confiável e também de metodologia, necessários para o estudo de problemas associados a poços tubulares. Também a aplicação desta técnica de perfilagem em aulas de graduação de Geofísica associada a métodos geoeletrônicos tornou-se interessante.

O sistema de perfilagem descrito a seguir foi inteiramente construído no laboratório de Instrumentação Geofísica do IAG-USP desde o guincho, a sonda de temperatura e até os circuitos digitais e analógicos, incluindo as placas PCB dos circuitos eletrônicos. O microcontrolador DSD de arquitetura RISC de 16 bits empregado foi programado em linguagem C.

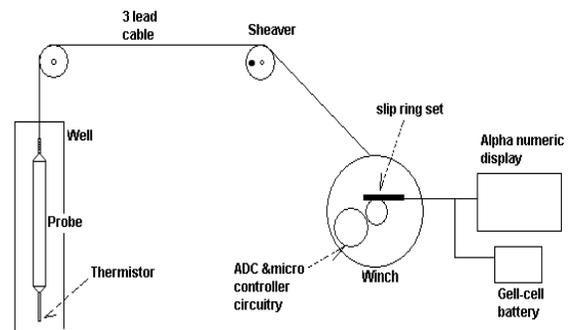


Figura 1 – Diagrama em blocos. Sistema de perfilagem contínua de temperatura de poços tubulares.

As técnicas de aquisição, de processamento e as estratégias implementadas no projeto eletrônico mostraram-se bastantes satisfatórias pois foi possível desenvolver um equipamento bastante estável e confiável dentro dos padrões usados internacionalmente. Os sistemas de perfilagem para temperatura podem ser

divididos em quatro subsistemas básicos (Fig 1); i) a sonda com o sensor de temperatura, ii) o cabo multifios, iii) o sistema de medida de profundidade (*sheaver*) e, iv) o guincho, com o sistema de aquisição de dados na superfície, normalmente um PC com software de aquisição.

Os sensores de temperatura de resistência semicondutora usados para medidas de gradientes geotermiais mais comuns são compostos de óxidos de manganês, níquel e cobalto. Estes óxidos sinterizados são dispositivos semicondutores cerâmicos denominados termistores, que possuem elevados coeficientes de temperatura.

Os termistores intercambiáveis com coeficiente negativo de temperatura (NTC) apresentam resposta exponencial em temperatura, uma histerese praticamente nula e excelente reprodutibilidade. Assim, um sistema de conversão de alta resolução e estabilidade fez se necessário para assegurar a qualidade de todo sistema. Foi utilizado um conversor conversor analógico digital (ADC) tipo delta-sigma com 22 bits de resolução. O módulo ADC usado foi o MCP3551 (Microchip®), com filtros de 50 e 60Hz já embutido internamente.

Um conjunto de chaves analógicas CMOS controlado pelo microcontrolador faz sequencialmente 10 amostragens de tensão no NTC e duas no cabo de descida. O microcontrolador calcula os valores médios, subtraindo-os a seguir e convertendo-os em valores de resistência elétrica do NTC somente. Este ciclo de operações é executado numa frequência de 10 vezes por segundo e apresentados no display LCD. A técnica de amostragem reduz o ruído devido a oscilações de temperatura e ao ruído elétrico originado dentro do poço. O sistema como um todo apresentou uma resolução melhor que 0,01°C.

Uma técnica denominada *radiometric* (Halle 2008) usada foi de extrema importância para a performance do equipamento. Nesta configuração, a polarização do sensor de temperatura NTC é feita com a mesma tensão de referência do ADC, resultando numa excelente estabilidade do sinal medido. Outra medida adotada que também teve bons resultados foi o uso de 3 conjuntos escova(grafite)-coletor(anel de cobre(veja Figura 1) para comunicação serial do microcontrolador com o display LCD inteligente externo e para a polarização do módulo de aquisição fixado no guincho. Isto permitiu conectar todo o conjunto ADC/microcontrolador no carretel do guincho.

O microcontrolador empregado (dsPIC30F4013) possui arquitetura RISC de 16 bits e alta capacidade de processamento. Ele permite cálculos rápidos tanto do valor da resistência do sensor quanto da temperatura equivalente por meio da Eq.3 implementada no *firmware*.

Para se conectar a sonda de temperatura dentro do poço com o equipamento de aquisição na superfície é usado um cabo de 3 vias de 300m de comprimento. O programa implementado no microcontrolador (*firmware*) subtrai automaticamente a variação dos valores da resistência do cabo antes do cálculo da resistência média do sensor.

A relação resistência-temperatura do NTC é dada por:

$$R = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} + \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1)$$

Onde:

- R - resistência a temperatura T, (Ω),
- R₀ - resistência a temperatura T₀, (Ω),
- β - constante, característica do material (K),
- T, T₀ – temperaturas absolutas, K.

O coeficiente de temperatura da resistência é dada por:

$$\left(\frac{dR/dT}{R} \right) = - \beta / T^2 \quad (2)$$

Assumindo que a temperatura de referência T₀ é 298 K (25° C), a constante β será da ordem de 4,000, e o valor deste coeficiente à temperatura ambiente (25° C) será -0.045.

Devido ao comportamento exponencial dos termistores, as sondas devem ser calibradas em laboratório usando banhos termostáticos ultra estáveis. Neste procedimento de calibração, alguns pontos da resposta de resistência elétrica do sensor em função da temperatura foram obtidos usando um banho termostático ultra estabilizado HAAKE MK22. Com estes dados foi possível ajustar os parâmetros a, b e c, que é uma boa aproximação da Eq. 1, conhecida como equação de Steinhart e Hart:

$$\frac{1}{T} = a + b \ln R + c (\ln R)^3 \quad (3)$$

onde:

- T- temperatura absoluta (K),
 - R- resistência do termistor,
 - a,b, c: constantes determinadas experimentalmente.
- Para intervalos de 100°C ou menos, a precisão da curva de ajuste está dentro de ± 0.02° C (Doebelin, 1983). Logo os valores de temperatura podem ser determinados com os parâmetros (a, b e c) e a Eq. 3 implementados no *firmware*.

Resultados

As perfilagens de temperatura dos poços P1 e P2 foram feitas em épocas diferentes, sendo a primeira em 11/03/2010 (a tarde) e, a segunda em 10/06/2010(de manhã). Os níveis de água NA medidos nos poços foram 7,5 e 7,3 metros, respectivamente. Nos 2 poços, os primeiros 54 m foram revestidos de tubo PVC (diâmetro interno:10cm e espessura:1 cm), que evitam

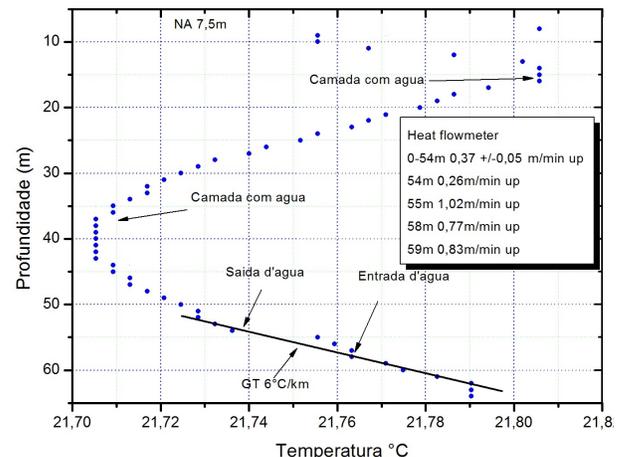


Figura 2 – Perfil de temperatura do Poço 1.

desmoronamentos das paredes dos poços nas camadas superficiais pouco consolidadas.

Nas Figs. 2&3 nota-se ótima correlação do perfil de resistividade elétrica (Fig.4) obtido anteriormente através de sondagens elétricas de superfície, com o comportamento térmico dos poços. No poço P1, nos intervalos de profundidade 13 a 18 m e 36 a 43 m, os gradientes de temperatura estão próximos de zero. Nestas profundidades, os valores de resistividade elétrica (Fig.4) foram baixos indicando, possivelmente, a presença de água doce. A diferença de temperatura entre estas camadas é de 0,1°C, estando a superior ligeiramente aquecida.

Testemunhos coletados durante a perfuração de P1 indicam a presença de argila siltosa amarela e areia média e grossa com pedregulhos esparsos, na primeira camada de gradiente de temperatura zero e, de argila siltosa dura na segunda (Borges, 2002).

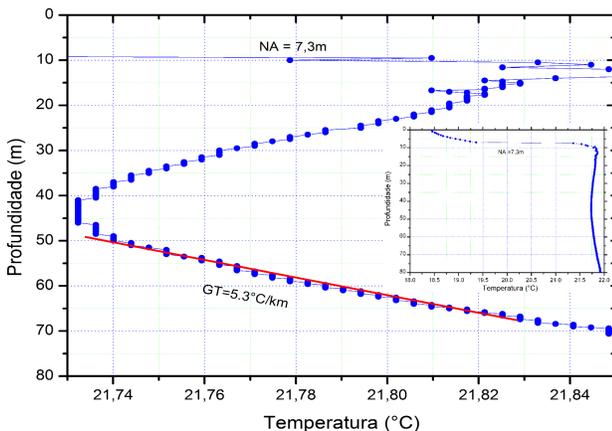


Figura 3 - Perfil detalhado de temperatura do poço P2 . Na imagem à direita tem-se o perfil completo.

Até a profundidade de 54m não ocorre entrada e saída de água de formação, nos 2 poços. Nota-se que dentro da precisão de $\pm 0,01^\circ\text{C}$, a água dentro do tubo entra em equilíbrio de temperatura com a água doce circundante ao tubo em poucos dias, pois praticamente não ocorre movimento convectivo dentro do tubo de PVC. Dentro do tubo de PVC do poço P1 foi medido um ligeiro fluxo ascendente de valor $0,37 \pm 0,05 \text{ m/min}$, com um *heatflowmeter* Robertson®.

Usando o critério de Ramey (Jessop, 1980), a entrada de água no poço P1 ocorre na profundidade de 58m, saindo a 55 m. Possivelmente esta fratura no granito alimenta este poço tubular de água doce. Neste poço, o medidor de fluxo de água detectou um fluxo ascendente entre 55 e 58m, que concorda com a conclusão baseada no critério de Ramey..

A partir da profundidade de 58 m, a curva do gradiente geotérmico GT é de 6°C/km , tendendo para o valor regional de aproximadamente 20°C/km .

O comportamento térmico do poço P2 (Fig3) é semelhante ao do poço P1 (Fig2), exceto que a camada superior com água doce de P2 está mais perturbada. Nesta mesma figura (3) está representado o mesmo perfil, com resolução de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, onde não é possível visualizar as camadas onde os gradientes de temperatura são nulos. Fora do tubo de PVC observa-se um gradiente de temperatura de $5,3^\circ\text{C/km}$, próximo ao de P1.

Discussão e Conclusões

A constante de tempo da sonda de temperatura é de aproximadamente 15 s, e após este intervalo, as leituras dos valores de resistência do NTC tornam-se muito estáveis e a flutuação torna-se inferior a 1 Ohm. Perturbações associadas com entrada ou saída de água doce dentro do poço aumentam o tempo de aquisição para aproximadamente 1 minuto.

O modelo de resistividade elétrica (Fig 4) mostra valores de resistividade superiores a $2000 \Omega.m$, indicando a presença de um embasamento granito-gnáissico pouco fraturado. Possivelmente os 2 poços sejam abastecidos por fraturas a 58m de profundidade no poço 1 e a 71m, no poço 2.

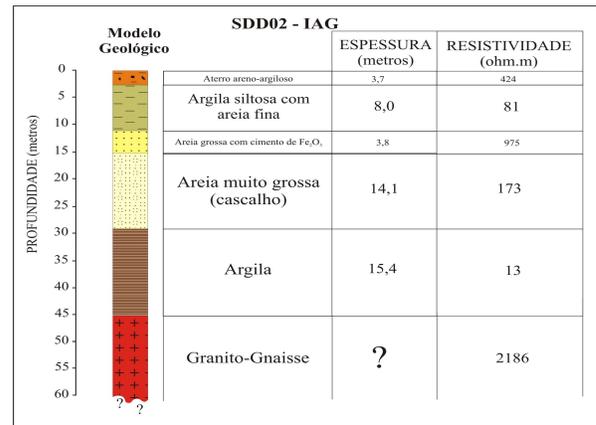


Figura 4. Perfil geológico/geoeletrico do SCGR

Portanto para ter-se alguma informação geofísica de perfis de temperatura de poços pouco profundos é necessário perfilagem com precisão melhor que $\pm 0,01^\circ\text{C}$. Equipamentos com sensores de diodos semicondutores comumente usados tem precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ não permitem bom detalhamento do poço.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP pelo apoio financeiro dado ao projeto de desenvolvimento de instrumentação geofísica.

Referências

Beck, A.E., 1965, Techniques of Measuring Heat Flow on Land, in Lee, W.H.K., Ed., *Terrestrial Heat Flow* :24-57..

Beck, A.E., 1991, *Physical Principles of Exploration Methods*, Wuerz Publishing Ltd, Winnipeg, Manitoba, Canada.

Blackwell, D.D. and Spafford, R.E., 1987, *Experimental Methods in Continental Heat Flow*, in *Methods of Experimental Physics*, Eds: Sammis, C.G. and Henyey, T.L., Academic Press, V24B; pp189-226.

Borges, W.R., 2002. *Investigações Geofísicas na Borda Sedimentar de São Paulo, Utilizando-se GPR e Eletrorresistividade*. Dissertação de Mestrado, IAGUSP.

Doebelin, E.O., 1983, Measurements Systems: Application and Design, McGraw-Hill, Inc.

Halle, E., 2008, Precision RTD Instrumentation for Temperature Sensing, MICROCHIP Technology Inc. AN1154.

Hiodo, F.Y., Yamabe, T.H., Ribeiro, F.B. and Galhardo, L., 1997, Perfilagens de Temperatura em Poços Profundos: Instrumentação e Aplicações. In Proceedings of the V Inter. Congr. of Brazilian Geophysical Society,

Jessop, A.M., 1980. Thermal Geophysics. In Developments in Solid Earth Geophysics- 17, Elsevier

Katz, I.M and Shaughnessy, E.J., 1988, An electronically switched flowmeter and temperature sensor employing a single thermistor probe. J. Phys. E. Sci. Instrum, 21.

Roy, R.F., Decker, E.R., Blackwell, D.D. and Birch, F., 1968, Heat Flow in the United States. J.Geophys. Res., 73, 5207-5221.

Trietley, H.L., 1985. All About Thermistors. Radio-Electronics, January;P 47-51.