

# DESENVOLVIMENTO DE UMA SONDA DE NÊUTRONS PARA MEDIDA DE UMIDADE DE SOLO UTILIZANDO UM DETECTOR DE ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ .

Iran José Oliveira da Silva<sup>1</sup>, Clemente J.G. Carneiro<sup>2</sup>, Helen Khoury<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Energia Nuclear-UFPE  
Av. Prof. Luiz Freire 1000  
50540-740, Recife, PE, Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG  
Av. Contorno 842/920  
30110-060 Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil

## RESUMO

Um protótipo de uma sonda de nêutrons foi construído utilizando-se um cristal de  ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$  como detector de nêutrons térmicos. Pulsos de luz produzidos pela reação nuclear  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{He}$  foram transmitidos para um tubo fotomultiplicador na superfície do solo através de um guia líquido de luz. Guias líquidos de luz têm várias vantagens quando comparados com um feixe de fibras de vidro. Primeiro, as perdas de luz são menores nos guias líquidos, já que não existe o efeito de empacotamento do feixe de fibras de vidro. Segundo, a manipulação repetida de fibras de vidro resulta na quebra dessas fibras. Terceiro, guias líquidos têm propriedades excelentes de transmissão na faixa visível. Finalmente, a principal vantagem deste protótipo quando comparado as sondas que utilizam detectores gasosos é a eliminação da interferência eletromagnética que pode ocorrer dentro do solo. Foram realizados testes do sistema eletrônico e também de calibração do protótipo para verificar a viabilidade do uso dessa sonda. A curva de calibração foi realizada em um tonel de 60 cm diâmetro e 42 cm altura. Este tonel estava completamente cheio com solo seco ao ar. As contagens no centro do tonel com o solo seco ao ar e saturado foram obtidas para determinar-se a curva de calibração da sonda. Essas contagens foram normalizadas pela contagem de nêutrons térmicos na água tanto para o detector cintilador de  ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$  como para um detector gasoso à base de  ${}^3\text{He}$ .

Keywords: neutron probe, crystal of  ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ , liquid light guide.

## I. INTRODUÇÃO

Existem várias técnicas para a determinação da umidade dos solos. Gardner, em 1986, apresentou as vantagens e desvantagens de cada método. Várias são as maneiras de se classificar os métodos de determinação da umidade de solos, podendo ser classificados como métodos de campo ou de laboratório, destrutivos e não-destrutivos ou ainda diretos ou indiretos. As técnicas capacitivas e de moderação de nêutrons são praticamente as duas únicas que são aceitas para se medir umidade de solo em condições de campo e de maneira não-destrutiva. Neste sentido, Chanasyk and Naeth, em 1996, consideraram o método de moderação de nêutrons como um método estabelecido para se medir umidade em condições de campo. Evett and Steiner, em 1995, consideraram também que as técnicas capacitivas não apresentam precisão suficiente e aceitável para a medida rotineira de umidade de solo. Num estudo desenvolvido por Hignett, em 2000, foram apresentadas as

vantagens e desvantagens de cada método em função das características do solo.

A sonda de nêutrons é um instrumento para determinar a umidade de solos. Ela é constituída de uma fonte de nêutrons rápidos, um detector de nêutrons térmicos e um sistema eletrônico de amplificação e medida de pulsos elétricos. As interações dos nêutrons com os núcleos dos elementos constituintes do solo ocorrem por dois processos: captura de nêutrons pelos núcleos e espalhamento de nêutrons por colisões elásticas e inelásticas com os núcleos dos elementos do solo. O espalhamento de nêutrons é o processo em que se baseia o princípio de funcionamento da sonda de nêutrons. Quando um mesmo nêutron colide sucessivamente com o hidrogênio da molécula da água presente no solo, sua energia é reduzida, podendo atingir valores da ordem de 0,025 eV (termalização). Alguns nêutrons assim termalizados podem provocar em detector de nêutrons térmicos uma taxa de reações nucleares com o  ${}^{10}\text{B}$  ou com o  ${}^6\text{Li}$ . Essa taxa é proporcional à umidade do

solo, já que os nêutrons são termalizados principalmente pelo hidrogênio constituinte da água.

Os principais problemas das sondas de nêutrons estão associados a sua eletrônica, uma vez que os circuitos de alta-tensão e de pré-amplificação são encapsulados em um cilindro de aço inoxidável, juntamente com a fonte radioativa ( $^{241}\text{Am-Be}$  ou  $^{252}\text{Cf}$ ), dificultando sua manutenção. Para se realizar qualquer manutenção nos circuitos de pré-amplificação ou de alta tensão é imprescindível retirar esses circuitos de dentro do tubo de aço inoxidável. Isto evita que o técnico de manutenção seja exposto diretamente à radiação da fonte.

As sondas de nêutrons utilizam detectores proporcionais do tipo  $\text{BF}_3$  ou  $^3\text{He}$ . Esses detectores apresentam baixa sensibilidade tanto aos raios gama como também aos nêutrons rápidos emitidos pela fonte. Assim, para se aumentar a eficiência para os nêutrons térmicos é comum o uso de detectores na forma de longos tubos, com comprimentos acima de 10 cm. Jensen and Somer, em 1967, estudaram a viabilidade da substituição dos detectores gasosos por detectores cintiladores de cristais de  $\text{LiI}(\text{Eu})$  enriquecido com  $^6\text{Li}$  visando melhorar o desempenho dessas sondas. Eles demonstraram que a principal vantagem destes cintiladores em relação aos detectores gasosos é a sua melhor eficiência para detecção de nêutrons térmicos. Eles são de dimensões milimétricas, porém permitem obter taxas de contagens iguais ou superiores às obtidas com tubos  $\text{BF}_3$  ou  $^3\text{He}$ . Contudo, como os cristais de  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$  são bastante higroscópicos, eles devem ser utilizados em sistemas altamente selados. Esse fato deve ter contribuído fortemente para uso generalizado dos detectores tipo  $\text{BF}_3$  e  $^3\text{He}$  na construção das sondas de nêutrons.

Existem várias importantes vantagens da utilização de cintiladores para nêutrons térmicos em substituição aos detectores convencionais construídos com tubos contendo  $^3\text{He}$  pressurizado. Existem mais moles de  $^6\text{Li}$  nesses cintiladores do que no tubo de gás de  $^3\text{He}$ . Além disso, nos cintiladores esses átomos se distribuem espacialmente de maneira mais uniforme, resultando em um maior volume sensível para detecção de nêutrons, e em conseqüência uma maior eficiência de detecção. Do ponto de vista de segurança, tanto os cintiladores plásticos como os de vidro enriquecidos de  $^6\text{Li}$  são seguros. Eles podem ser transportados sem cuidados especiais, inclusive na bagagem pessoal.

A utilização de cintiladores acoplados a guias de luz pode viabilizar o desenvolvimento de uma nova sonda de nêutrons. As técnicas que utilizam guias de luz apresentam vantagens tais como simplicidade, versatilidade, segurança e utilidade em ambientes hostis ou normalmente inacessíveis. Devido ao fato de serem construídos a partir de materiais isolantes, os guias de luz não estão sujeitos à ruídos eletromagnéticos, possibilitando a monitoração remota, uma vez que podem transportar feixes luminosos por longas distâncias sem perdas de propagação apreciáveis. O objetivo deste trabalho é construir um protótipo de sonda de nêutrons utilizando um cintilador de  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$  acoplado a um guia de luz líquido de 10 metros de

comprimento, determinando a sua curva de calibração, e comparando essa curva com aquela obtida com uma sonda de nêutrons convencional, isto é, utilizando um detector gasoso.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

**Arranjo Experimental.** O detector de nêutrons térmicos utilizado é constituído de um cristal de  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$ , com 3,25mm de diâmetro por 41mm de comprimento, acoplado opticamente a um guia de luz líquido de 10m de comprimento, conforme mostrado na Fig.1. Esse acoplamento foi possível juntando-se o cristal à janela de quartzo do guia de luz utilizando-se uma graxa ótica. Em seguida, o conjunto foi selado dentro de um cilindro de alumínio a fim de evitar o contato com o ar e a infiltração de luz.

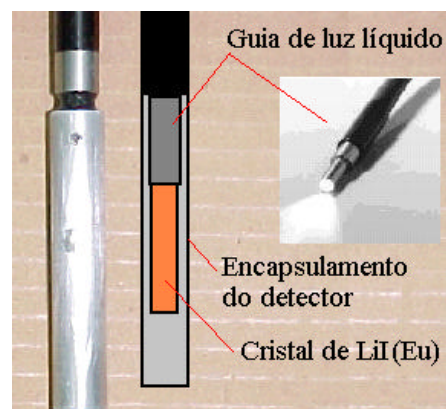


Figura 1. Detector de  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$  acoplado a um guia líquido de luz.

Para a realização das medidas de umidade de solo, o detector foi fixado dentro de um cilindro de alumínio de 0,5mm de espessura mostrado na Fig. 2. Esse arranjo tem a finalidade não só de manter uma geometria fixa entre o detector e a fonte de  $^{252}\text{Cf}$ , como também de proteger o detector contra possíveis choques mecânicos. Em seguida, a outra extremidade do guia de luz foi acoplada ao fotocátodo do tubo fotomultiplicador. O pulso eletrônico era enviado a um pré-amplificador e em seguida a um sistema de aquisição de dados constituído de amplificador, discriminador de pulsos e placa "multiscaler" (Fig. 3).

Desta forma, os pulsos de luz produzidos no cristal devido à incidência dos nêutrons térmicos eram transmitidos ao tubo fotomultiplicador, através do guia de luz, para serem convertidos em sinais elétricos e detectados pelo sistema eletrônico.

Vale salientar que foi colocado 2,0 cm de chumbo entre o detector e a fonte de  $^{252}\text{Cf}$  para minimizar a detecção direta de raios gama emitidos pela fonte.

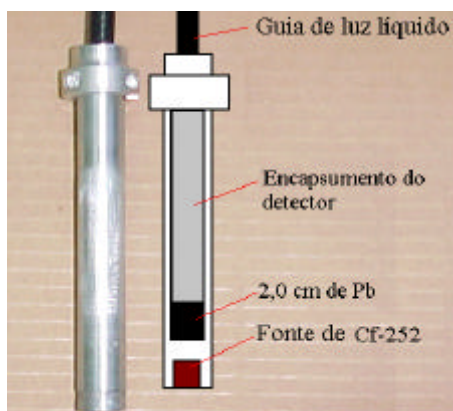


Figura 2. Sistema de encapsulamento do detector mostrando a fonte de  $^{252}\text{Cf}$  e a blindagem de chumbo de 2 cm de Pb.

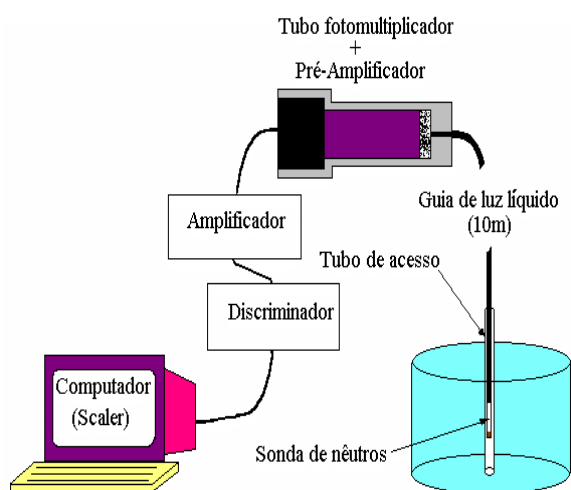


Figura 3. Diagrama do protótipo da sonda de nêutrons mostrando o detector de nêutrons de  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$  no interior do tonel e sistema de aquisição de dados.

**Calibração da sonda nêutrons.** A calibração da sonda de nêutrons foi realizada utilizando-se duas técnicas. A primeira técnica é baseada na determinação das contagens nas umidades do solo seco ao ar e saturado no centro de um tonel (SS). A segunda consiste em progressivamente alimentar um tonel, inicialmente com solo seco, com quantidades conhecidas de água (LP).

Para determinar a reta de calibração da sonda, umidade versus contagem normalizada para a água, de acordo com a técnica SS (Carneiro et al., 1997) foi utilizado o arranjo descrito na Fig. 4. Do tonel de solo seco ao ar foi retirada uma amostra que foi levada a uma estufa à  $105^\circ\text{C}$ . Dessa maneira foi medida a umidade do solo seco ao ar. Foi então realizada uma série de contagens no centro do tonel. Em seguida, o solo foi levado à saturação de maneira lenta, introduzindo-se, de cada vez 2 litros de água, de baixo para cima, através de um sistema de alimentação, conforme mostrado na Fig. 4. Esta operação evita o deslocamento das partículas mais finas durante o processo de umedecimento.

Após a saturação, foi realizada outra série de medidas com a sonda. Da quantidade total de água introduzida no solo, foi subtraída a lâmina residual de água na superfície do solo para possibilitar a determinação da umidade de saturação. Com a finalidade de possibilitar uma análise comparativa dos resultados também foi utilizado um detector  $^3\text{He}$ , modelo LND 201, que é geralmente utilizado nas sondas de nêutrons.

Um segundo experimento foi realizado para determinar a curva de calibração da sonda em pontos intermediários, ou seja, entre as umidades do solo seco a  $105^\circ\text{C}$  e a umidade do solo saturado, aplicando-se a técnica das laminas progressivas. Esta técnica é baseada no trabalho de Carneiro & De Jong, 1985, e consiste em alimentar o tonel, inicialmente com solo seco, com quantidades conhecidas de água de baixo para cima, usando-se um arranjo similar aquele da Fig. 4. Uma camada de brita de 10 cm foi colocada no fundo tonel para garantir uma alimentação uniforme de água na base do mesmo e conseqüentemente um fluxo de água ascendente e uniforme. Os valores médios de umidade do solo são calculados dividindo-se cada lâmina acumulada de água pela altura do solo, isto é, altura do tonel menos a camada de brita. Esses valores são então correlacionados linearmente com o somatório das contagens em diversas profundidades normalizadas para a contagem na água. Essas medidas foram feitas utilizando-se o cintilador de  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$  com o objetivo de verificar a linearidade da curva de calibração.



Figura 4. Tonel para calibração da sonda de nêutrons mostrando o sistema de alimentação de água.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para obter as retas de calibração das duas sondas de nêutrons ( $^3\text{He}$  e  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$ ) foram aplicadas as duas técnicas de calibração de sondas, SS e LP. Para a técnica SS foram feitas contagens na água, no solo seco ao ar e no solo saturado. Na Tabela 1 são apresentados os valores médios dessas contagens e seus respectivos desvios-padrão. A partir desses valores foram determinados os valores de CR, contagem no solo seco dividida pela contagem na água, para as respectivas umidades, e conseqüentemente as retas de calibração de ambas as sondas (Tabela 2)

TABELA 1. Taxas de Contagens, CPM, para os Detetores de  $^3\text{He}$  e  $^6\text{Li}(\text{Eu})$ , no Tonel com Água, Solo Seco ao Ar e Saturado.

Detector	Água	Solo seco	Solo saturado
$^3\text{He}$	43988±286	180±15	18894±155
$^6\text{Li}(\text{Eu})$	26894±478	407±19	11596±106

TABELA 2 Umidades do Solo Seco ao Ar e Saturado, Respective Valores de CR e Reta de Calibração das Sondas.

$\theta$	CR ( $^6\text{Li}(\text{Eu})$ )	CR ( $^3\text{He}$ )
0,0100	0,0151	0,0004
0,3139	0,4312	0,4295
Reta de Calibração	$\theta = -0,001 + 0,728\text{CR}$	$\theta = 0,010 + 0,731\text{CR}$

O resultado obtido pelo método LP é mostrado na Fig. 5. A reta de calibração foi obtida correlacionando-se os cinco primeiros pontos obtidos experimentalmente. A partir do sexto ponto devido a fuga de nêutrons térmicos através da superfície do solo, o valor de CR torna-se subestimado. Nos primeiros pontos a fuga é pequena, constante, e pode ser considerada desprezível. Porém, à medida que a água se desloca para a interface solo/ar, a fuga de nêutrons térmicos aumenta diminuindo as contagens, o que pode ser observado pelo desvio na reta de calibração em relação aos pontos 6, 7 e 8. Esse método, baseado na alimentação progressiva de lâminas de água, valida o método de calibração que utiliza apenas duas umidades e as respectivas contagens para determinar a reta de calibração de uma dada sonda de nêutrons.

A reta de calibração obtida pelo método LP é dada pela equação:  $\theta = (0,004 \pm 0,002) + (0,745 \pm 0,02)\text{CR}$ , com o coeficiente de determinação  $R^2 = 0,998$ . Essa reta e aquelas obtidas pelo método SS, Tabela 2, não diferem significativamente. Dessa maneira pode-se concluir que o método que utiliza apenas dois valores de umidade pode ser usado para calibração da sonda de nêutrons, com foi proposto por Carneiro et al., 1997.

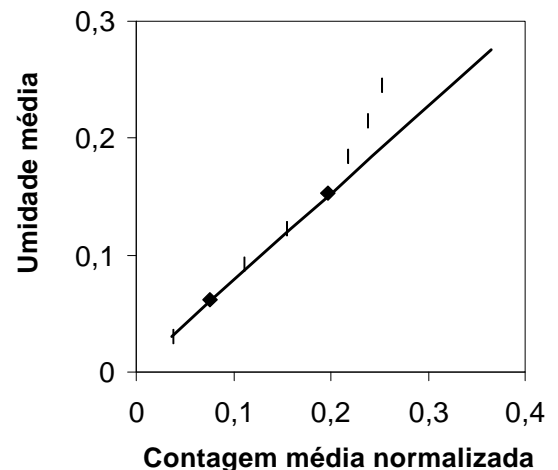


Figura 5. Umidade média no perfil de solo versus o valor médio do somatório das contagens normalizadas ao longo do perfil do solo.

#### IV. CONCLUSÕES

A detecção de nêutrons térmicos utilizando um cintilador acoplado a um guia líquido de luz pode ser uma alternativa para a construção de sondas de nêutrons convencionais. Além da ausência de interferência eletromagnética, essa sonda pode ser usada para medir perfis de umidade de solos cultivados com culturas de sistemas radiculares profundos, tais como o eucalipto e a algaroba.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Gardner, W. H. **Water content In: Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods.** A. Klute (ed.), American Society of Agronomy, Inc. of Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin (USA), Agronomy Series Number 9, 21:493-544, 1986.
- [2] Chanasyk, D. S. and M. A. Naeth. **Field measurement of soil moisture using neutron probes.** Canadian Journal of Soil Science 76, no. 3: 317-323, 1996.
- [3] Evett, S. R. and J. L. Steiner. **Precision of Neutron-Scattering and Capacitance Type Soil-Water Content Gauges from Field Calibration.** Soil Science Society of America Journal 59, no. 4:961-968, 1995.
- [4] Hignett, C T. **Factors affecting the decision to select a soil water sensing technology.** Joint FAO / IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture. Techdoc 1137 :28, 2000.
- [5] Jensen, P. A. and E. Somer. **Techniques in Soil-**

**Moisture and Density Measurements.** In *Isotope and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies*, Proceedings of a Symposium :31-48, 1967.

[6] Carneiro, C. J. G., A. C. D. Antonino, and A. Dall'Olio. 1997. **Calibração de sonda de nêutrons: um problema ainda não resolvido?** IV Encontro de Aplicações Nucleares, Poços de Caldas, MG 1: 426-428.

[7] Carneiro da Silva, C. and E. De Jong. **In situ determination of the slope of calibration curve of neutron probe.** *Soil Science* 139, no. 3:250-254, 1985.

### ABSTRACT

A prototype of soil moisture probe was build using a crystal of  ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$  as a thermal neutron detector. Light pulses are produced by the exoergic nuclear reaction  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{He}$  and transmitted through the light guide to a photomultiplier tube on the soil surface. Liquid light guides have several advantages when compared with bundle of glass fibers. First, liquid guides do not suffer from packing fraction losses spaces between fibers that cause reduced coupling efficiency. Second, repeated handling of liquid light guides does not result in the breakage typical of glass bundles, which reduces efficiency over time. Third, liquid guides have excellent UV transmission properties with a cut off the near infrared spectrum yielding an optimum transmission for visible applications. The major advantage of this prototype is the elimination of the electromagnetic interference inside of the soil. Tests were carried out aiming the improvement of electronic and technical viability aspects of neutrons probes. The soil moisture probe calibration curve was carried out in a drum of 60 cm diameter and 42 cm height. This drum was completely filled with an air dry soil. Counts in the center of the drum with the dry and saturated soils make possible to obtain the curves of the soil water content versus the normalized counts for two thermal neutron detectors. The medium value of the counts, the standard deviation and the number of counts were obtained for  ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$  and  ${}^3\text{He}$  detectors, respectively for water, air dry, and saturated soil. From those measurements, a linear calibration curve was obtained for each of detectors.