

ESTUDO DE GERAÇÃO DE CAMPO UNIFORME PARA MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA

A. M. de Jesus Chaves Neto & O. P. Verma

Para estudar os problemas de prospecção geofísica eletromagnética através de modelagem analógica, as condições em escala natural são representadas, no laboratório, em escala reduzida de acordo com a teoria da similitude. Portanto, para investigar os problemas de técnicas VLF, AFMAG e MT, freqüentemente é necessário criar um campo uniforme no arranjo experimental. Os sistemas físicos para geração de campos uniformes estudados aqui são a bobina circular, bobina de Helmholtz, solenóide, um plano de corrente, e dois planos paralelos de correntes. Os mapas de porcentagem de desvio de campo estão presentes para todos os sistemas estudados aqui. Um estudo comparativo desses sistemas mostra que o solenóide é a maneira mais eficiente para criar um campo uniforme, seguido pelo sistema de bobinas de Helmholtz. Porém, o campo criado em um solenóide está em um espaço fechado onde é difícil colocar modelos e substituí-los para executar experimentos. Portanto, recomenda-se o uso de bobinas de Helmholtz para criar um campo uniforme. Este último sistema fornece um campo uniforme com espaço aberto suficiente, o que facilita o experimento.

Palavras-chave: Campo uniforme; Campo magnético; Distância ótima; Desvio.

A STUDY ON GENERATION OF UNIFORM FIELD FOR ELECTROMAGNETIC ANALOG MODELLING - *In order to study the electromagnetic prospecting problems in geophysics through analog modelling, the full scale conditions are represented in the laboratory at a reduced scale according to the theory of similitude. Therefore, to investigate the problems of VLF, AFMAG and MT techniques, it is necessary to create a uniform field in the experimental set up. The systems studied generating uniform fields are a circular coil, a Helmholtz coil system, a solenoid, a rectangular coil, a plane of currents and a two parallel planes of currents. The percentage deviation maps were presented for all the systems studied here. A comparative study of these systems shows that the solenoid is the most efficient way to create an uniform field followed by a Helmholtz coil system. Nevertheless, the field created within a solenoid is a closed space where it is difficult to place models in order to carry out the experiments. Therefore, it is recommended the use of a Helmholtz coil system because it provides sufficient open space on an uniform field that facilitates the experiments.*

Key words: *Uniform field; Magnetic field; Optimal distance; Deviation.*

Curso de Pós-Graduação em Geofísica
Centro de Geociências, UFPA.
C. P. 309, Belém, PA.
FAX: 091-211-1693

INTRODUÇÃO

A geração de campo uniforme primário e variável no tempo, ou seja, onda planas eletromagnéticas, com frequência controlável, é importante nas modelagens geofísicas como, por exemplo, dos métodos MT, AFMAG e VLF. Nestes métodos, as respostas dos modelos colocados no campo uniforme são estudadas para simular diferentes situações geológicas, Verma (1981). As modelagens analógicas desenvolvidas com base na teoria da similitude, Keller & Frischknecht (1966), são amplamente empregadas nos estudos geofísicos eletromagnéticos devido a sua versatilidade e baixo custo.

O objetivo desse trabalho é obter um volume de campo uniforme primário que seja conveniente para realizar experimentos em laboratório. Foram estudados os campos gerados pelas bobinas circulares e quadradas, bobinas de Helmholtz, solenóide, um e dois planos de corrente. O mapa de contorno do desvio percentual do campo magnético em relação a um valor de referência, será utilizado para obter informação sobre a distribuição volumétrica do desvio do campo. Através deste pode-se determinar a região de desvio adequado para a colocação do modelo alvo, Chaves Neto (1996).

BOBINA CIRCULAR

Escolhendo o sistema em coordenadas cilíndricas (ρ, ϕ, z) , no eixo geométrico da bobina de raio a e cuja origem está no centro da bobina. $H_\rho(\rho, z)$ e $H_z(\rho, z)$ são os escalares do campo magnético nas direções ρ e z , respectivamente, cuja unidade é ampere por unidade de comprimento a .

Obtém-se que $H_z \gg H_\rho$, na região mais interna $(-0,15a < z < 0,15a$ e $-0,2a < \rho < 0,2a$) da bobina e, H_ρ é nulo no centro da bobina, $(0,0)$, onde H_z é máximo no eixo (ρ, z) . Portanto, escolhe-se o campo magnético na direção z para analisar os volumes de desvios percentuais do campo magnético H_z em relação a $H_z(0,0)$, conforme a Fig. 1. Obtendo-se volumes, aproximados, dos cilindros de $\pi(0,08a)^2(0,24a) \cong 0,005a^3$ para 1%, de $\pi(0,12a)^2(0,34a) \cong 0,0154a^3$ para 2% e de $\pi(0,15a)^2(0,4a) \cong 0,0283a^3$ para 3%.

BOBINAS DE HELMHOLTZ

É o caso de duas bobinas circulares paralelas de raio

a , centradas axialmente e separadas pela distância igual a do raio. Tem-se, o campo magnético resultante total possuindo componentes na direção ρ , $h_\rho(\rho, z)$, e na direção z , $h_z(\rho, z)$, com origem no centro geométrico do sistema das solenóides ($\rho=0, z=a/2$). Da Fig. 2 obtêm-se volumes aproximados de campo h_z com desvios de $\pi(0,4a)^2 0,38a \cong 0,191a^3$ para 1%; $\pi(0,42a)^2 0,45a \cong 0,249a^3$ para 2% e $\pi(0,43a)^2 0,48a \cong 0,278a^3$ para 3%. É interessante citar que nesses volumes, h_ρ é desprezível.

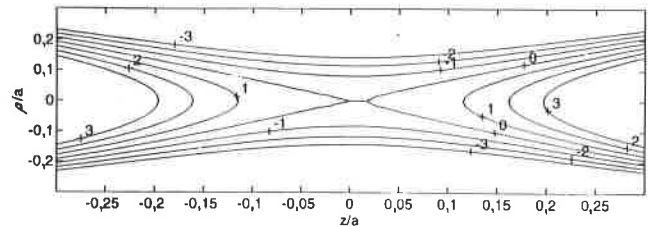


Figura 1 - Mapa de contorno dos desvios percentuais de campo magnético H_z em relação a $H_z(0,0)$, no plano ρz da bobina circular.

Figure 1 - Contour map of percentage deviation of the magnetic field H_z in relation to $H_z(0,0)$, on the plane of the coil ρz .

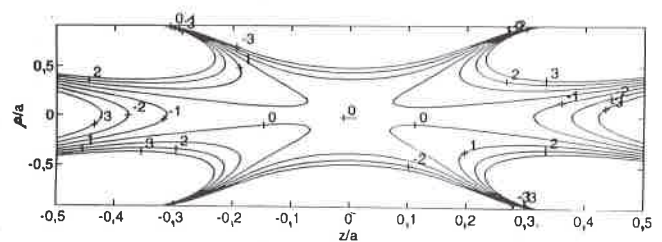


Figura 2 - Mapa de contorno do desvio percentual do campo magnético h_z em relação ao campo magnético $h_z(0,0)$.

Figure 2 - Contour map of percentage deviation of magnetic field h_z in relation to $h_z(0,0)$.

SOLENÓIDE

Neste caso, o campo magnético na direção ϕ é nulo por causa da simetria azimutal deste sistema físico. O campo magnético H_ρ é muito menor do que H_z na região

volumétrica mais interna ($-0,2L < z < 0,2L$; $-0,8a < \rho < 0,8a$) do solenóide de raio a , e comprimento longitudinal L . Portanto, pode-se desprezar H_ρ nesta região.

A Fig. 3 mostra raios de cilindros de, aproximadamente, $0,9a$ para desvios de 1%, $0,92a$ para 2% e $0,94a$ para 3%. Também, obtêm-se, aproximadamente, comprimentos longitudinais de cilindros de desvios, conseguindo $0,38L = 0,38(11a) = 4,18a$ para desvio de 1%; $0,5L = 0,5(11a) = 5,5a$ para 2% e $0,58L = 0,58(11a) = 6,38a$ para 3% de desvio.

Portanto, pode-se obter volumes aproximados de desvios de $\pi(0,9a)^2 4,18a = 10,63a^3$ para desvios de 1%; $\pi(0,92a)^2 5,5a = 14,62a^3$ para desvio de 2% e $\pi(0,94a)^2 6,38a = 17,71a^3$ para desvio de 3%.

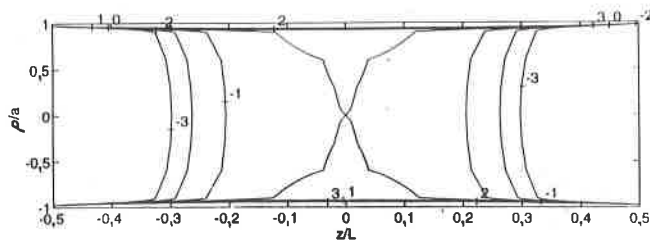


Figura 3 - Mapa de contorno de desvios percentuais de H_z em relação a $H_z(0,0)$, onde $L = 11a$, $Dz = 0,1a$.

Figure 3 - Contour map of the percentage deviation of the magnetic field, H_z , in relation to $H_z(0,0)$, where $L = 11a$, $Dz = 0,1a$.

BOBINA QUADRADA

A bobina quadrada, de lado L , com origem de coordenadas cartesianas no centro da bobina, e com o plano xy coincidindo com o plano da bobina, possui três campos $H_x(x,y,z)$, $H_y(x,y,z)$ e $H_z(x,y,z)$, onde H_z é muito maior do que H_x e H_y na região mais central da bobina ($-0,15L < x < 0,15L$; $-0,15L < y < 0,15L$; $-0,08L < z < 0,08L$), e também tem-se que $|H_x| = |H_y|$ devido a simetria, portanto H_x e H_y são desprezados nesta região.

A Fig. 4 fornece os comprimentos longitudinais dos cilindros de desvios de $2 \times 0,031L = 0,062L$ para 1%; $2 \times 0,055L = 0,11L$ para 2% e $2 \times 0,077L = 0,154L$ para 3% de desvio percentual de H_z em relação a $H_z(0,0,0)$. Também fornece raios de cilindros de desvios de $0,05L$ para

1%; $0,07L$ para 2% e $0,11L$ para 3% de desvio. Portanto foram obtidos os volumes de desvios percentuais de H_z em relação a $H_z(0,0,0)$, aproximadamente de $\pi(0,05L)^2 (0,062L) = 4,869 \times 10^{-1} L^3$ para 1%; de $\pi(0,07L)^2 (0,11L) = 0,0017L^3$ para 2% e de $\pi(0,1L)^2 (0,154L) = 0,0048L^3$ para 3%.

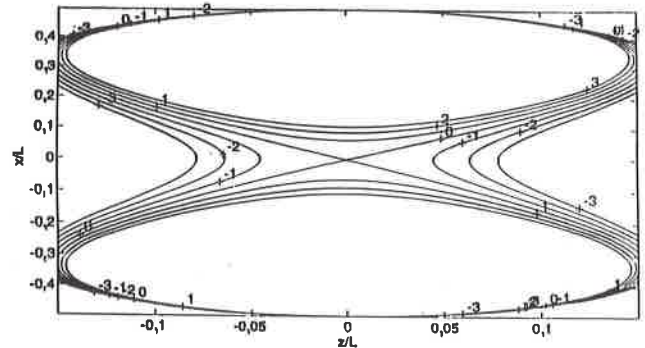


Figura 4 - Mapa de contorno de desvios percentuais do campo magnético H_z em relação a $H_z(0,0,0)$ no plano xz , em $y = 0$.

Figure 4 - Contour map of the percentage deviation of the magnetic field H_z in relation to $H_z(0,0,0)$ in the plane xz , with $y = 0$.

UM PLANO DE CORRENTE

Para um plano de corrente finito, quadrado de lado L e discreto, possuindo um número total de N fios de corrente e passo Δy entre cada fio, com origem no centro de coordenadas no centro do plano, com o plano xy coincidindo com o plano do mesmo. Temos o campo magnético escalar $H_y(x,y,z)$ na direção y , e o campo magnético escalar $H_z(x,y,z)$ na direção z , ambos em unidade de ampere por unidade de comprimento L . Podem-se utilizar valores de $\Delta y < 0,05L$ com $N > 21$ fios.

A Fig. 5 ilustra, aproximadamente, a área da base quadrada de um prisma de desvios de $(2 \times 0,20)^2 L^2 = 0,16L^2$ para 1%; $(2 \times 0,26)^2 L^2 = 0,27L^2$ para 2% e $(2 \times 0,30)^2 L^2 = 0,36L^2$ para 3% de desvios. No plano xy a uma dada posição $z = 0,05L$. Também fornece os comprimentos longitudinais de prismas de desvios: de $0,01L$ para 1%; $0,017L$

para 2% e $0,026L$ para 3% de desvio. Portanto, os volumes de desvios percentuais, de H_y em relação a $H_y(0;0;0,05L)$, são de, aproximadamente, (área da base \times comprimento) $1,2 \times 10^{-3}L^3$ para 1%; $5 \times 10^{-3}L^3$ para 2% e de $9,8 \times 10^{-3}L^3$ para 3%.

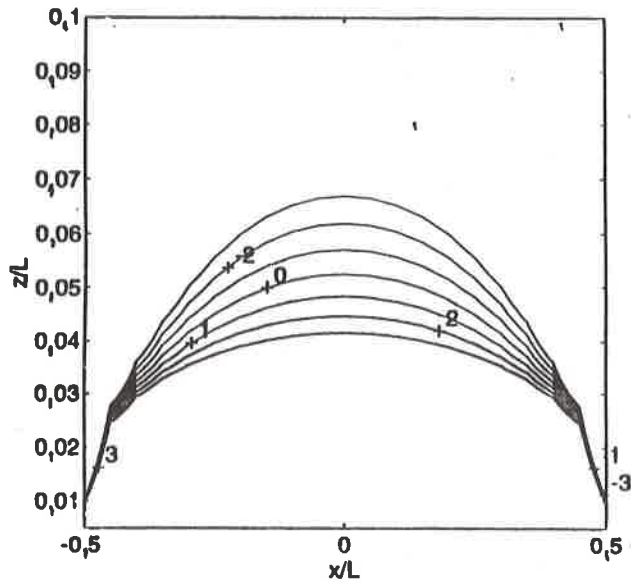


Figura 5 - Desvios percentuais de $H_y(x;0;z)$ em relação ao campo magnético $H_y(0;0;0,05L)$ para o plano geométrico xz .

Figure 5 - Percentage deviation of the $H_y(x;0;z)$ in relation to magnetic field $H_y(0;0;0,05L)$ to the geometric plane xz .

DOIS PLANOS DE CORRENTE

Colocando, agora, dois planos de corrente centralizados axialmente a uma distância fixa d , no eixo z . Existe uma defasagem de π radianos entre as correntes dos dois planos. A origem de coordenadas esta no plano xy no centro da distância d entre os dois planos. A distância ótima é de $d = 0,2L$, Chaves Neto (1996).

O campo magnético total possui componentes na direção y , $h_y(x,y,z)$ e na direção z , $h_z(x,y,z)$. Novamente, o campo magnético na direção x é nulo por razões de simetria neste mesmo eixo.

O campo magnético h_z é muito menor do que h_y na região mais central ($-0,3L < x < 0,3L; -0,3L < y < 0,3L; z$), sendo nulo em $(0,0,0)$, mas da mesma ordem de grandeza de H_y na proximidade das bordas dos planos de corrente. Logo h_z pode ser desprezado nesta região mais central em trabalhos experimentais de campo magnético, com um sistema físico de dois planos de corrente. O campo h_y é simétrico em relação a origem $(0,0,0)$, diferente de h_z que é assimétrico em relação a este ponto.

A Fig. 6 fornece comprimentos longitudinais de cilindros de $0,11L$ para 1%; $0,135L$ para 2% e $0,14L$ para 3% de desvio. Apresentando-se círculos, aproximadamente, de raios $0,14L$ para 1%; $0,19L$ para 2% e $0,23L$ para 3% de desvio. Assim foram obtidos, aproximadamente, volumes de desvios percentuais do campo h_y em relação a $h_y(0,0,0)$ na forma geométrica de cilindro, os quais são de $\pi(0,14L)^2(0,11L) = 0,0068L^3$ para 1%; de $\pi(0,19L)^2(0,13L) = 0,0153L^3$ para 2% e de $\pi(0,23L)^2(0,14L) = 0,0233L^3$ para 3%, no caso de $N = 21$ fios e $d = 0,2L$.

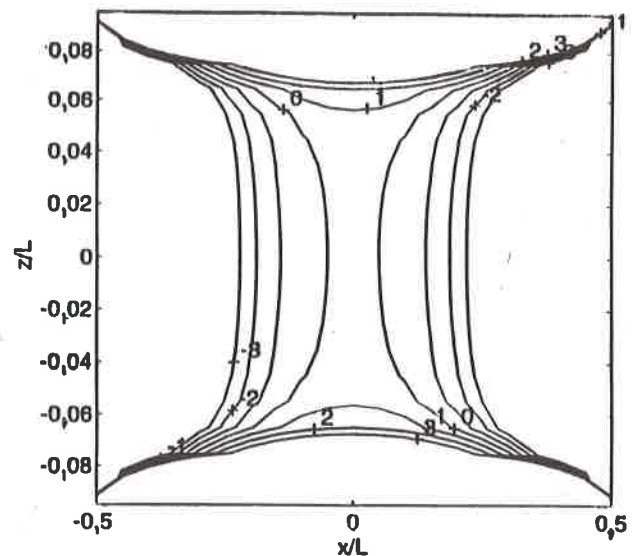


Figura 6 - Mapa de contorno do desvio percentual do campo magnético h_y em relação a $h_y(0,0,0)$ no plano xz em $y = 0$, para $d = 0,2L$ e $N = 21$. Observe a simetria de h_y em torno de $(0,0,0)$.

Figure 6 - Contour map of percentage deviation to h_y in relation to $h_y(0,0,0)$ in plane xz in $y = 0$, with $d = 0,2L$ and $N = 21$. Note the symmetry of h_y around $(0,0,0)$.

COMPARAÇÕES

Nas Figs. 7, 8 e 9, considera-se que a bobina circular, as bobinas de Helmholtz e o solenóide possuem raio a ; comprimento do solenóide igual a l ou $2a$; a bobina quadrada, um e dois planos de corrente com lado igual a $2a$. Calculando-se em suas distâncias ótimas, para comparação.

Na Fig. 7 o solenóide possui maior área transversal de desvio de todos, seguido de um plano de corrente e, a seguir têm-se um pouco menor e aproximadamente iguais, as bobinas de Helmholtz e dois planos de corrente, e depois, finalmente, quase iguais, as bobinas circular e quadrada.

Na Fig. 8 o solenóide possui o maior comprimento longitudinal de prismas de desvios de todos, seguido das bobinas de Helmholtz, depois, aproximadamente, dois planos de corrente, a bobina circular, bobina quadrada e, por último, bem pequeno, um plano de corrente.

Na Fig. 9 o solenóide possui volume de desvio muito maior de todos os demais, seguido das bobinas de Helmholtz, a seguir dois e um planos de corrente, e finalmente as bobinas circular e quadrada de corrente.

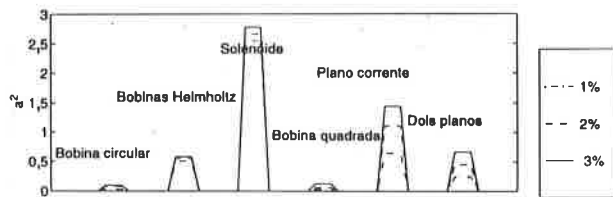


Figura 7 - Quadro comparativo entre as áreas transversais de prismas de desvios dos sistemas físicos deste trabalho.

Figure 7 - Comparative scheme of the transversal areas of prisms of deviation of the physical systems in this work.

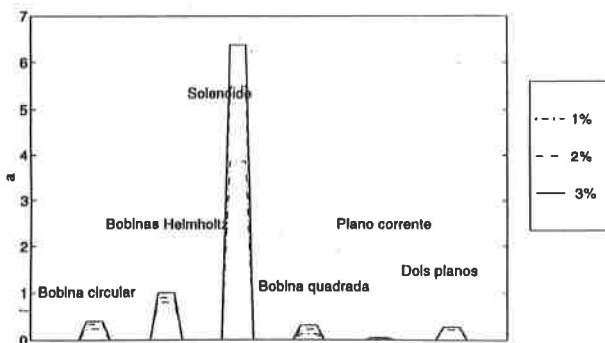


Figura 8 - Quadro comparativo entre os comprimentos longitudinais de prismas de desvios dos sistemas físicos deste trabalho.

Figure 8 - Comparative scheme of lengths of prisms of deviation of the physical systems in this work.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram que o solenóide possui sua distância ótima do comprimento longitudinal, para se obter campo uniforme, maior ou igual do que l/α para $\Delta z = 0, l\alpha$, Chaves Neto (1996). O campo na direção radial pode ser considerado nulo na região de desvio de até 3% do campo na direção longitudinal.

Nas bobinas de Helmholtz, o campo na direção radial pode ser desprezado na região de desvio de até 3% do campo na direção longitudinal.

O sistema físico de dois planos quadrados de corrente cujo campo na direção entre os planos pode ser desprezado na região mais central deste sistema físico, possui distância ótima de $0,2L$ entre os planos. É um sistema muito prático para se trabalhar experimentalmente.

No interior da bobina circular de corrente, o campo na direção radial pode ser considerado nulo nas regiões de desvio absoluto de até 3% do campo na direção longitudinal. Já a bobina quadrada de corrente é o sistema físico mais fácil de construir de todos os outros sistemas vistos neste trabalho, cujos campos nas direções paralelas, podem ser desprezados em relação ao campo na direção perpendicular, nas regiões de desvio de até 3%.

O plano quadrado de corrente possui a distância ótima de $0,05L$ do plano, a partir do seu centro geométrico, onde nos temos o máximo de volume de campo uniforme, o qual é muito pequeno para colocação de modelos alvo no laboratório, pois necessita de um plano com comprimento lateral muito grande comparado com as dimensões do modelo alvo.

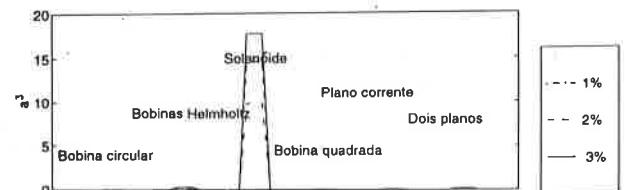


Figura 9 - Quadro comparativo entre os volumes de desvios dos sistemas físicos utilizados neste trabalho.

Figure 9 - Comparative scheme of volumes of deviation of the physical systems in this work.

AGRADECIMENTOS

Ao convênio UFPA/PETROBRÁS/FADESP/CNPq/FINEP, pelo suporte financeiro a este programa de pós-graduação. Ao Curso de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará. Ao Departamento de Física da UFPA, e aos professores Dr. José Ricardo Santos de Souza e Dr. Abel Carrasquilla.

REFERÊNCIAS

CHAVES NETO, A. M. J. -1996- Estudo de geração de campo uniforme para modelagem eletromagnética. Tese de mestrado, Belém-PA, UFPA, 73pp.

DOSSO, H. W. - 1966- A plane-wave analogue model for studying electromagnetic variations: Canadian Journal Physics, **44**: 67-80.

FRISCHKNECHT, F. C. - 1988- Electromagnetic

physical scale modeling. In: Nabighian, M. N., (ed.) Electromagnetic methods in applied geophysics-theory. Tulsa. Society of Exploration Geophysicists. (Investigations in Geophysics,3), **1**: 365-441.

GRANT, F. S. & WEST, G. F. - 1965- Interpretation theory in applied geophysics. New York, Mc Graw-Hill Book. 584 pp.

KELLER, V. G. & FRISCHKNECHT, F. C. -1966- Electrical methods in geophysical prospecting. Oxford, Pergamon Press. 517 pp. (International Series in Electromagnetic Waves, 10).

VERMA, O.P. -1981- Electromagnetic response of fold models in a uniform field. Geophysical Prospecting, **29**: 451-461.

Submetido em: 06/03/97

Revisado pelo autor(es) em: 25/08/98

Aceito em: 30/08/98

A STUDY ON GENERATION OF UNIFORM FIELD FOR ELECTROMAGNETIC ANALOG MODELLING

In order to study the electromagnetic prospecting problems in geophysics through analog modelling, the full scale conditions are represented in the laboratory at a reduced scale according to the theory of similitude. Therefore, to investigate the problems of VLF, AFMAG and MT techniques, it is necessary to create a uniform field in the experimental set up. Various physical systems for generating the uniform fields were analysed theoretically in this paper. The systems studied generating the uniform fields, are a circular coil, a Helmholtz coil system, a solenoid, a rectangular coil, a plane of currents and a two parallel planes of currents. Analytical relations were obtained for the magnetic fields at a point in space and subsequently the conditions for a uniform field. In cases where the conditions for the uniform field could not be obtained analytically, the

percentage deviations of the field with reference to a pre-selected point was computed. The magnetic field maps as well as the percentage deviation maps were presented for all the systems studied here. Also, the volume of the space available for various percentage deviations of the uniform field has been calculated. A comparative study of scheme of the transversal areas, lengths and volumes of prisms of deviation of the physical systems shows that the solenoid is the most efficient way to create an uniform field followed by a Helmholtz coil system. Nevertheless, the field created within a solenoid is a closed space where it is difficult to place models in order to carry out the experiments. Therefore, it is recommended the use of the Helmholtz coil system because it provides sufficient open space on an uniform field that facilitates the experiments.

NOTAS SOBRE O AUTOR

NOTES ABOUT THE AUTHOR

Antonio Maia de Jesus Chaves Neto

Bacharel e licenciado em Física pela Universidade Federal do Pará, mestre em Geofísica pelo Departamento de Geofísica do Centro de Geociências da UFPA, com uma

dissertação intitulada "Estudo de Geração de Campo Uniforme para Modelagem Eletromagnética". Atualmente no curso de Doutorado em Física do Instituto de Física da Unicamp. É professor de Física da UFPA.