

IFUSP/P-724

B.I.E.-USP

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE FÍSICA
CAIXA POSTAL 20516
01498 - SÃO PAULO - SP
BRASIL

PUBLICAÇÕES

IFUSP/P-724

PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM CONJUNTO DE
BOBINAS CORRETORAS PARA HOMOGENEIZAÇÃO DO CAM
PO DE UM ÍMÃ DIPOLAR

13 JAN 1989



L.R. Pires, Y. Miyao, G. Moscati

Instituto de Física, Universidade de São Paulo

Agosto/1988

PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM CONJUNTO DE BOBINAS CORRE-
TORAS PARA HOMOGENEIZAÇÃO DO CAMPO DE UM ÍMÃ DIPOLAR *

L.R. Pires , Y. Miyao, G. Moscati.

Laboratório do Acelerador Linear, Instituto de Física da Uni-
versidade de São Paulo, Caixa Postal 20516, São Paulo, 01498,
São Paulo, Brasil

RESUMO

Apresentamos um método para melhorar a homogeneida-
de da distribuição da densidade de fluxo magnético no "gap"
de um ímã dipolar. Ele se baseia na correção do campo magnéti-
co por meio de um conjunto de bobinas feitas na forma de cir-
cuitos impressos, análogos àqueles utilizados em circuitos e-
letrônicos.

A vantagem deste método reside na sua simplicida-
de, pequena ocupação de espaço e baixo custo.

O método foi aplicado para corrigir o campo de um
ímã dipolar tendo funcionado adequadamente.

Este método não é original. Entretanto, neste tra-
balho será explicado detalhadamente o procedimento utilizado
permitindo assim sua utilização nas condições locais.

* Aceito em 8 de julho de 1988 para publicação na Revista de Fí-
sica Aplicada e Instrumentação.

ABSTRACT

We present a method to improve the homogeneity of
the distribution of the magnetic flux density in the gap of a
dipole magnet. It is based on correcting the magnetic field
by means of a system of coils, which employs etching thin
copper foils, similarly as those for electronic circuits.

The advantage of this method lies on its simplicity,
its small space use and its low price.

The method was applied to correct the field of a
dipole magnet, and it worked properly.

This method is not original. However we present in
detail the procedure utilized, which will allow its application
in local conditions.

1) Introdução

Projetamos, construímos e testamos um conjunto de bobinas para homogeneizar o campo de um ímã dipolar, visando-se com isto a dominar o método de correção de campo através de bobinas corretoras construídas em circuito impresso. Com essas bobinas, projetadas através de mapeamentos realizados com um medidor de campo magnético no "gap" do ímã dipolar, consegue-se tornar o campo mais homogêneo.

Pretendíamos fazer a correção no "gap" de um ímã dipolar, com um campo médio de aproximadamente 1.200 gauss, para obtermos uma distribuição de campo mais homogênea. No entanto, isto não foi possível, pois a resolução do medidor de campo magnético disponível no laboratório, $\pm 0,5$ gauss, é da mesma ordem das variações de campo que se verificam na região central do "gap". Optamos então pela introdução de uma perturbação, no caso uma lâmina de ferro com 0,04 cm de espessura e $(2,0 \times 5,0)$ cm² de área, que introduziu variações da ordem de 14 gauss na região central do plano médio do "gap" do ímã dipolar.

O procedimento geral utilizado é descrito em vários artigos da literatura. Neste trabalho apresentamos os principais resultados e descrevemos detalhadamente os procedimentos aplicados a uma situação concreta.

2) Princípio de homogeneização do campo magnético

Nas regiões do "gap" de um ímã dipolar, em que o

campo magnético tem pequenas inomogeneidades, conforme figura 1, o módulo da componente tangencial da densidade de fluxo magnético (B_t), em um dado ponto, é muito menor do que o da componente normal (B_n). Sendo assim, como a densidade de fluxo magnético total é dada por $\vec{B} = \vec{B}_n + \vec{B}_t$, e seu módulo por $B = \sqrt{B_n^2 + B_t^2}$, podemos dizer que $B \approx B_n$. A figura 1 mostra a representação de um campo no "gap" de um ímã dipolar.

Com o medidor de campo magnético de bobina rotativa utilizado não se consegue medir B_t , mas somente $B \approx B_n$. Contudo podemos estimar o comportamento de B_t , conforme será mostrado.

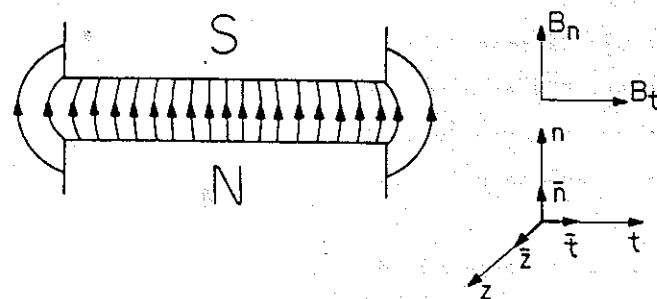


Figura 1 - Representação de um campo no "gap" de um ímã dipolar.

A lei de Ampère na forma diferencial é dada por $\text{rot } \vec{B} = \mu \vec{j}$. Ela relaciona a densidade de fluxo magnético \vec{B} , com a densidade de corrente \vec{j} num ponto. Sendo assim, em um ponto dentro de um condutor $\text{rot } \vec{B} = \mu \vec{j}$ e fora, por exemplo no "gap" de um ímã, $\text{rot } \vec{B} = 0$ e portanto $\frac{\partial B_n}{\partial t} = \frac{\partial B_t}{\partial n}$. Homogeneizar o campo magnético \vec{B} , no "gap", significa tornar $\frac{\partial B_n}{\partial t} = 0$, equivalente a tornar $\frac{\partial B_t}{\partial n} = 0$. Esta condição certamente é válida se impusermos $B_t = 0$; para tanto é necessário que uma corren-

te I flua perpendicularmente à direção da componente B_t de forma a compensá-la.

Mostraremos a seguir o procedimento utilizado para calcular a densidade de corrente em uma bobina corretora (1,2,3,4).

A figura 2 mostra uma folha fina de cobre, de espessura constante e , largura variável, percorrida por corrente, colocada nas proximidades de um semi-espaço de ferro na região $n < 0$ ($\mu_{\text{ferro}} = 10^3 \mu_{\text{ar}}$), estando eletricamente isolada do ferro.

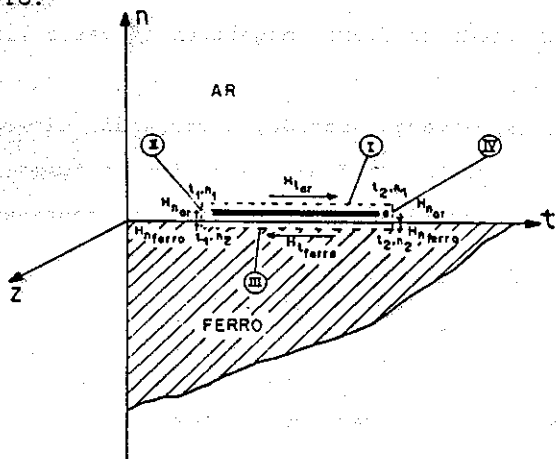


Figura 2 - Folha fina de cobre de espessura constante e , largura variável, percorrida por corrente que flui na direção do eixo z .

Da lei de Ampère, sabemos que $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint \vec{j} \cdot d\vec{s} = I$.

Para as integrais tomadas ao longo da linha tracejada que envolve a folha de cobre obteremos o seguinte resultado:

$$I = \int_{t_1}^{t_2} H_{\text{tar}} dt = \int_{t_1}^{t_2} i dt, \quad (2.1)$$

onde i é densidade linear de corrente. As integrais $\int H_n dn$ podem ser desprezadas numa primeira aproximação devido ao pequeno percurso de integração ($e \ll t_2 - t_1$). Sendo a permeabilidade do ferro muito maior do que a do ar, podemos também desprezar a contribuição da integral $\int H_{t\text{ferro}} dt$.

Podemos dizer então que:

$$i = H_{\text{tar}}$$

Sabendo-se que $B_{\text{tar}} = \mu_{\text{ar}} H_{\text{tar}}$, podemos então dizer que o módulo da componente tangencial da densidade de fluxo magnético, B_{tar} , é diretamente proporcional à densidade linear de corrente i , ou seja, $i = \frac{B_{\text{tar}}}{\mu_{\text{ar}}}$. No entanto para que no "gap" do ímã ocorra compensação de \vec{B}_t , componente tangencial da densidade de fluxo magnético, é preciso que $\vec{B}_t + \vec{B}_{\text{tar}} = 0$.

Desta forma, em cada ponto da bobina corretora, existe uma densidade linear de corrente proporcional ao módulo da componente tangencial da densidade de fluxo magnético que deve ser compensada. O estudo do comportamento desta componente nos permite estimar a corrente de correção.

A figura 3 mostra o esquema das linhas de campo no "gap" do ímã dipolar na presença da perturbação.

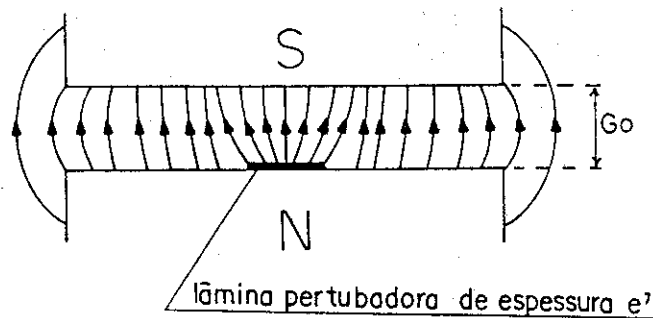


Figura 3 - Esquema das linhas de campo no "gap" do ímã dipolar na presença da perturbação.

Sabemos que $B = \sqrt{B_n^2 + B_t^2}$ e $B_t \ll B_n$; em um dado ponto, quanto menor for a componente B_t , mais próximos se encontrarão os módulos de \vec{B} e \vec{B}_n . As maiores variações da densidade de fluxo magnético localizam-se nas proximidades da lâmina colocada na superfície polar inferior. Assim, na região da perturbação, as linhas de campo quando não perpendiculares às peças polares, têm uma configuração tal que, com boa aproximação, as tangentes a essas linhas se aproximam da direção normal, quando se vai do polo inferior ao superior. Isto implica no fato de o módulo da componente tangencial da densidade de fluxo magnético aumentar, à medida que nos aproximamos do polo inferior.

Suponhamos que, em 1ª ordem, a componente tangencial da densidade de fluxo magnético varie só linearmente ao longo do "gap". Nestas condições, esquematizamos o comportamento da componente tangencial da densidade de fluxo magnético na figura 4.

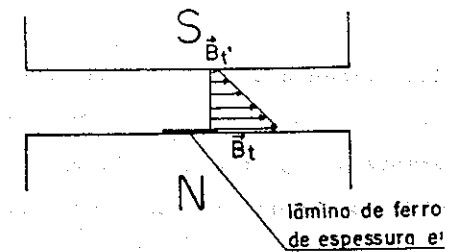


Figura 4 - Comportamento da componente tangencial da densidade de fluxo magnético ao longo de uma normal às faces polares, na presença da perturbação.

Vamos assumir que, em 1ª ordem, a componente tangencial da densidade de fluxo magnético só varia linearmente ao longo do "gap".

Na aproximação adotada, a variação da componente tangencial da densidade de fluxo magnético no "gap", ao longo de um eixo normal às faces polares, pode ser representada por:

$$\frac{\partial B_t}{\partial n} = \frac{B_t - B_t'}{G_0 - e'}$$

Definiremos a variável C como sendo:

$$C = \frac{B_t - B_t'}{B_t}$$

onde C = constante para um dado par de componentes tangenciais da densidade de fluxo magnético ao longo de um eixo normal às faces polares.

Lembrando que $\text{rot } \vec{B} = 0$ e que $B = B_n$ obtemos:

$$B_t = \frac{G_o - e'}{C} \cdot \frac{\partial B}{\partial t}$$

Substituindo este resultado na equação 2.1 obtemos:

MOS:

$$I = \frac{G_o - e'}{C \cdot \mu_{ar}} \cdot \Delta B$$

Este é o valor de corrente que circulará a uma distância e' do pólo inferior, compensando assim todas as componentes tangenciais do "gap" a partir deste plano.

Contudo no nosso caso, a corrente não irá circular a uma distância e' do pólo inferior, mas a uma distância $b = 0,35$ cm, que representa a distância existente entre o pólo inferior e o plano médio do circuito impresso, conforme pode ser visto na figura 5. Nestas condições utilizando o mesmo raciocínio anterior, chegamos a:

$$I = \frac{(G_o - b)}{\mu_{ar}} \cdot \frac{\Delta B}{C}$$

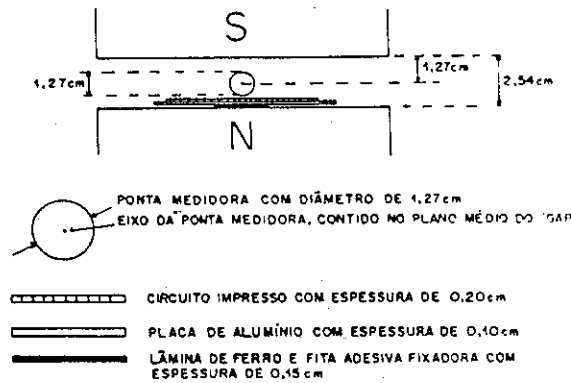


Figura 5 - Esquema do posicionamento do circuito impresso no "gap" do ímã dipolar.

Como $B_t' \ll B_t$ podemos fazer a aproximação: $C = 1$. Obtemos então para a corrente de correção:

$$I = \frac{G_o - b}{\mu_{ar}} \cdot \Delta B \quad (2.2)$$

Esta é a corrente que deve passar entre duas curvas de nível consecutivas da representação da densidade de fluxo magnético, separadas por um intervalo ΔB em gauss. Para que a componente tangencial da densidade de fluxo magnético \vec{B}_t seja compensada, é preciso que a corrente I flua perpendicularmente a \vec{B}_t ; como a direção de \vec{B}_t é paralela à direção do gradiente de \vec{B}_n , a corrente I terá que fluir na direção das linhas de mesma densidade de fluxo magnético (curvas de nível). Isto significa dizer que a corrente I estará sempre contida no plano normal a \vec{B}_n , e que as trilhas de cobre do circuito impresso devem corresponder às curvas de nível obtidas por meio dos mapeamentos.

Colocando-se o circuito num plano diferente do que originou seu mapeamento (pouco acima ou pouco abaixo do mesmo), precisamos saber o quanto se altera o campo nesta translação. Se esta alteração implicar em um aumento do campo, o circuito estará com número de espiras menor do que o necessário. Podemos então aumentar a corrente para compensar este efeito. Isto pode ser conseguido por meio de ΔB , uma vez que é diretamente proporcional a I , conforme equação (2.2). Definiremos ΔB como sendo:

$$\Delta B = \frac{M'}{M} p. \quad (2.3)$$

onde:

p representa, em gauss, o intervalo, entre duas curvas de nível consecutivas, utilizado na construção do circuito;

M representa o número de espiras do circuito construído com intervalo p ;

M' representa o número de espiras que o circuito deveria possuir com intervalo p na região onde é colocado.

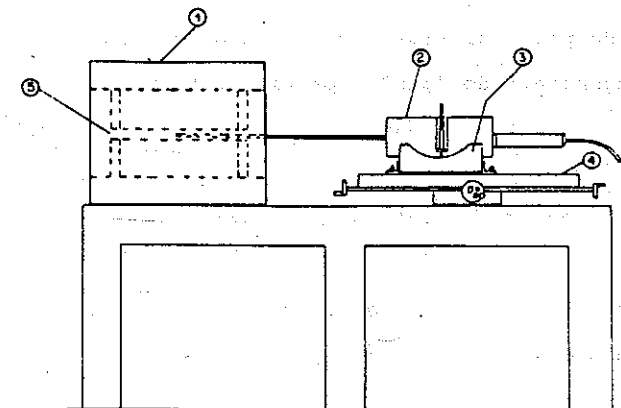
Podemos observar que se colocarmos o circuito no plano do mapeamento que o originou, $\Delta B = p$.

A equação (2.2) com ΔB definido conforme (2.3) nos fornece a corrente de correção de referência. Devido as aproximações feitas ao longo do cálculo esta corrente não representa a otimizada mas uma referência que nos facilita o encontro da corrente ideal, que é encontrada empiricamente e que fornece a melhor correção para a distribuição da densidade de fluxo magnético.

3) Procedimento Experimental

O esquema do arranjo experimental utilizado encontra-se na figura 6.

Como podemos observar, a ponta medidora de campo magnético encontra-se apoiada em um suporte que está sobre uma mesa de coordenadas, com curso de aproximadamente 40cm em 2 direções perpendiculares entre si. A distância entre a mesa de coordenadas e o ímã é tal que permite a introdução da extremidade da ponta do medidor no "gap" do ímã.



- ① - ÍMÃ DIPOLAR
- ② - MEDIDOR DE CAMPO MAGNÉTICO
- ③ - SUPORTE
- ④ - MESA DE COORDENADAS
- ⑤ - "GAP"

Figura 6 - Esquema do arranjo experimental utilizado.

13

Com um medidor de campo magnético de bobina rotativa, realizamos o mapeamento do campo, de forma que o eixo da ponta medidora fosse mantido em uma direção fixa no plano médio do "gap". A região varrida pelo medidor ao longo do "gap" está representada na figura 7. A peça polar inferior do ímã é indicada como referência.

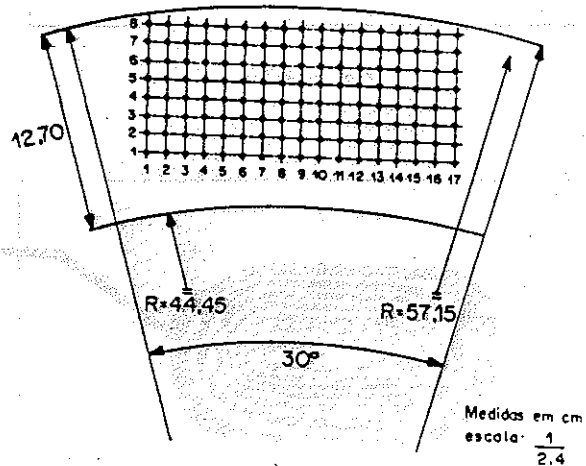


Figura 7 - A malha indica os pontos em que foram feitas as medidas tendo a peça polar inferior como referência. O passo da malha é de 1,2 cm.

O mapa de curvas de nível relativo a este mapeamento encontra-se na figura 8, e foi utilizado para construir a bobina corretora. A distribuição da densidade de fluxo magnético, em perspectiva, é mostrada na figura 9.

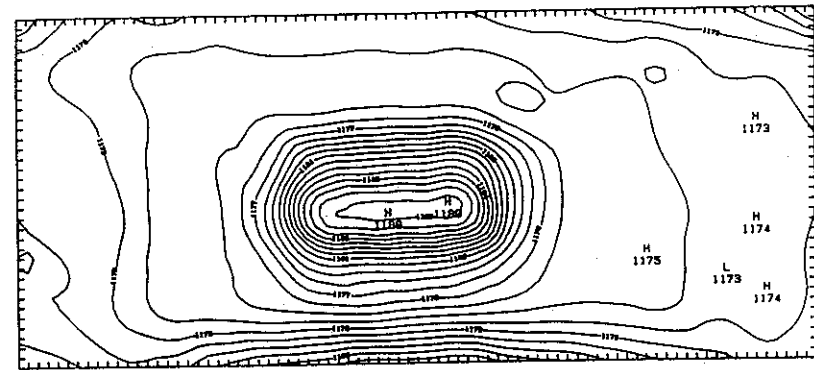


Figura 8 - Curvas de nível do plano médio do "gap" do ímã dipolar na presença da perturbação (lâmina de ferro com 0,04 cm de espessura e $(2,0 \times 5,0) \text{ cm}^2$ de área). O intervalo entre duas curvas consecutivas é de 1,0 gauss.

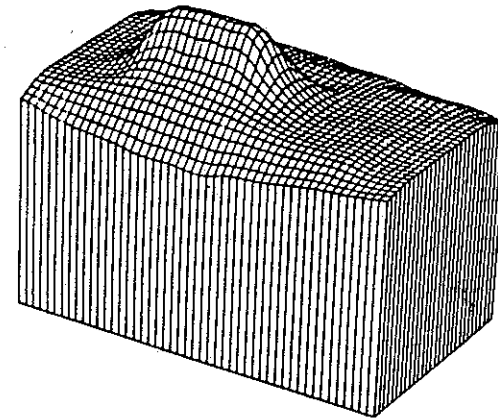
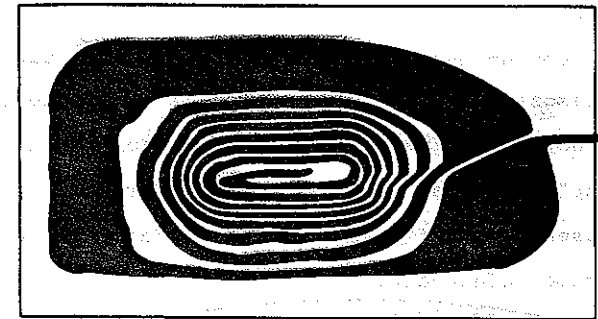
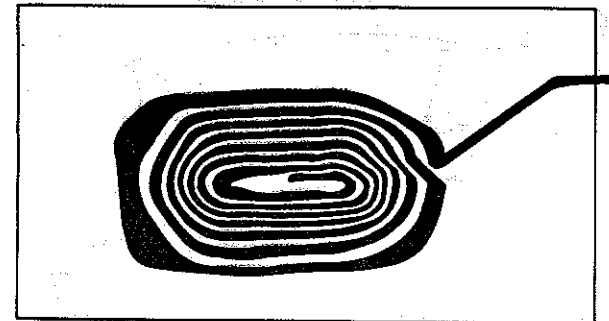


Figura 9 - Distribuição da densidade de fluxo magnético, em perspectiva, relativa ao mapeamento realizado no plano médio do "gap" do ímã dipolar

Cada trilha de cobre do circuito impresso é limitada por duas curvas de nível consecutivas, com intervalo de 1,0 gauss entre elas. As regiões intermediárias a estas trilhas, e que as isolam, também têm um intervalo de 1,0 gauss. As trilhas de cobre da face inferior do circuito impresso complementam as da face superior, isto é, a figura da face inferior representa o negativo da correspondente à face superior conforme figura 10. Ambos os desenhos são complementados por ligações que fazem as conexões em série entre as trilhas de cobre, representadas pelas discontinuidades existentes na figura 8. Estas conexões são feitas de maneira que, na face superior do circuito impresso, a corrente flua em forma de espiral, vindo de fora para o ponto onde a densidade de fluxo magnético é máxima; neste ponto a corrente passa para o outro lado do circuito, onde encontra novamente uma espiral de trilhas de cobre. A corrente circula no mesmo sentido em ambos os lados.



Face superior



Face inferior

Figura 10 - Conjunto de bobinas construídas em circuito impresso, para correção do campo magnético do "gap" do ímã dipolar.

Este circuito impresso duplo, apresenta várias vantagens sobre o simples, dentre elas o fato de apresentar consumo menor.

Projetamos e construímos o circuito impresso com passo de 1,0 gauss a partir do mapeamento realizado no plano médio do "gap", mas o colocamos nas proximidades do pólo inferior conforme mostra a fig. 5. Os mapeamentos realizados na presença da perturbação, um no plano médio do "gap" (figura 8) e outro a $Go/4$ acima do plano médio do "gap", nos mostram uma variação da ordem de 14 gauss para o primeiro caso e de 11 gauss para o segundo caso. Assim, devemos esperar que, na região onde foi colocada a bobina corretora, a perturbação seja ainda maior. Assumindo uma aproximação linear para a variação do campo, na região em que é colocada a bobina corretora (0,92cm abaixo do plano médio), esta variação é da ordem de 18 gauss. Desta forma utilizando a equação (2.3) obtemos:

$$\Delta B = \frac{18}{14} \cdot 1,0 = 1,3 \text{ gauss}$$

De acordo com a equação (2.2) obtemos o seguinte resultado para a corrente de referência: $I = 2,27A$.

Conforme explicado anteriormente esta corrente não representa a corrente otimizada. Com uma corrente de 2,10A alimentando o circuito impresso posicionado conforme figura 5, conseguimos obter a melhor correção para a distribuição da densidade de fluxo magnético no plano médio do "gap". Esta corrente foi encontrada empiricamente sendo que a correção por ela efetuada pode ser vista nas figuras 11 e 12.

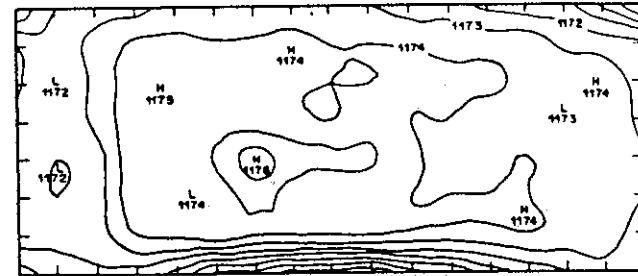


Figura 11 - Curvas de nível do plano médio do "gap" do ímã dipolar na presença da perturbação e do conjunto de bobinas corretoras construídas em circuito impresso alimentado pela corrente de 2,10A. O intervalo entre duas curvas de nível consecutivas é de 1,0 gauss.

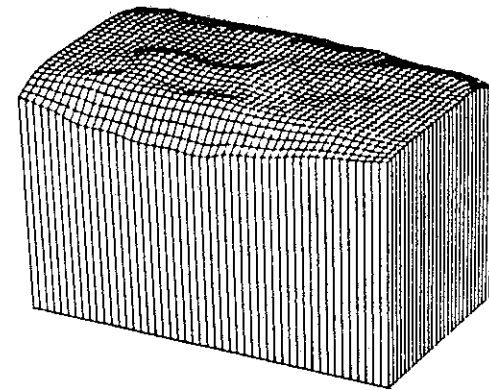


Figura 12 - Distribuição da densidade de fluxo magnético, em perspectiva, relativa ao mapeamento realizado no plano médio do "gap" do ímã dipolar, na presença da perturbação e do conjunto de bobinas corretoras alimentado pela corrente de 2,10A.

4) Discussões dos resultados obtidos

Pudemos comprovar experimentalmente a eficiência deste método de correção pois conseguimos eliminar 90% das inomogeneidades presentes na distribuição da densidade de fluxo magnético.

Além dos mapeamentos mostrados foram realizados outros que nos permitiram constatar:

- correção satisfatória nas proximidades do pólo superior, uma vez que as componentes tangenciais do campo gerado pela bobina variam linearmente ao longo do "gap", da mesma forma que as componentes tangenciais da densidade de fluxo magnético do ímã.
- possibilidade de se utilizar o mesmo circuito impresso para corrigir distribuições de densidade de fluxo magnético de intensidade diferentes, desde que estejamos operando na região linear da curva de magnetização do ferro, pois nestas condições as formas das curvas de nível não são alteradas.

As aproximações feitas para o comportamento da componente tangencial da densidade de fluxo magnético foram boas, pois nos conduziram a uma corrente de correção de referência (2,27A) que se encontra muito próxima da corrente otimizada (2,10), encontrada empiricamente e utilizada no mapeamento mostrado na figura 11.

Com as aproximações adotadas os resultados levaram em conta apenas fatores de 1ª ordem. No entanto, correções de

"2ª ordem"⁽⁵⁾ podem ser realizadas, se construirmos um novo conjunto de bobinas que utilizado juntamente com o primeiro, corrija as inomogeneidades residuais.

5) Conclusão

Pudemos verificar experimentalmente que a homogeneização de campos magnéticos por meio de bobinas corretoras pode ser realizada sem grandes dispêndios, sem dificuldades construcionais e requer ocupação de pequeno espaço físico, graças à sua dimensão.

O mesmo procedimento pode ser utilizado para outros ímãs, mesmo quando se necessita de correções mais "finas" do que as que foram efetuadas.

O método de homogeneização de campo magnético, apresentado neste trabalho, será utilizado, no futuro, para a correção do campo dos ímãs que serão construídos para o Acelerador Microtrón no Instituto de Física da USP.

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório do Acelerador Linear do Instituto de Física da USP, que recebe apoio financeiro da FINEP, do CNPq e da FAPESP.

Este trabalho foi concluído em 1987 como resultado da tese de mestrado de um dos autores⁽⁶⁾ (L.R. Pires).

Referências

- 1) U. Czok, Korrektur Ionenoptischer Bildfehler mit Oberflächenspulen, Dissertation zum Erlangung des Doktorgrades, Justus-Liebig Universität, Giessen (1976).
- 2) U. Czok, G. Moritz, and H. Wollnik, Nuclear Instruments and Methods 140, 39 (1977).
- 3) H. Wollnik, Nuclear Instruments and methods, 103, 479 (1972).
- 4) A. Leipertz, Elektronenoptische Ausmessung eines Quadrupols aus geätzten Oberflächenspulen, Diplomarbeit, Justus Liebig Universität, Giessen (1974).
- 5) G. Moritz, U. Czok, H. Wollnik, Nuclear Instruments and Methods 187, 75 (1981).
- 6) L.R. Pires, Projeto, construção e teste de um conjunto de bobinas corretoras para homogeneização do campo de um ímã dipolar. Dissertação de Mestrado, IFUSP 1987.