



20 de Setembro de 2019

## Validação da medida da magnetização dos blocos do ondulador Delta usando a bobina de Helmholtz

Luana Vilela e Reinaldo Basilio

Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, Campinas, Brazil

Este relatório apresenta os resultados dos testes feitos com a bobina de Helmholtz para verificar se este sistema tem a precisão necessária para caracterizar a magnetização dos blocos de ímã permanente dos onduladores tipo Delta.

# Introdução

O sorting dos blocos magnéticos é uma das etapas comumente incluídas no processo de minimização dos erros do campo magnético de um ondulador e consiste em otimizar a posição de cada bloco antes da montagem dos cassetes. Essa otimização é feita com base em resultados de medida da magnetização remanente de cada um dos blocos. O sistema de caracterização mais utilizado para este fim é o sistema de bobina de Helmholtz, que é composto por um par de bobinas na configuração de Helmholtz e um integrador digital que mede o sinal induzido pela movimentação do ímãs dentro das bobinas.

O sistema de bobina de Helmholtz disponível atualmente no LNLS (figura 1) foi projetado para medir a magnetização dos blocos de ímã permanente com volume muito maior do que os dos blocos que serão utilizados para o Delta. Como a amplitude do sinal induzido depende linearmente do volume do bloco, isso pode impossibilitar a caracterização dos blocos do ondulador Delta com este sistema de medida. Foram feitos diversos testes para verificar se este sistema poderia ser utilizado na caracterização destes ímãs permanentes, que devem apresentar erros de magnitude de magnetização menores que 1% e erros angulares menores que 1°.

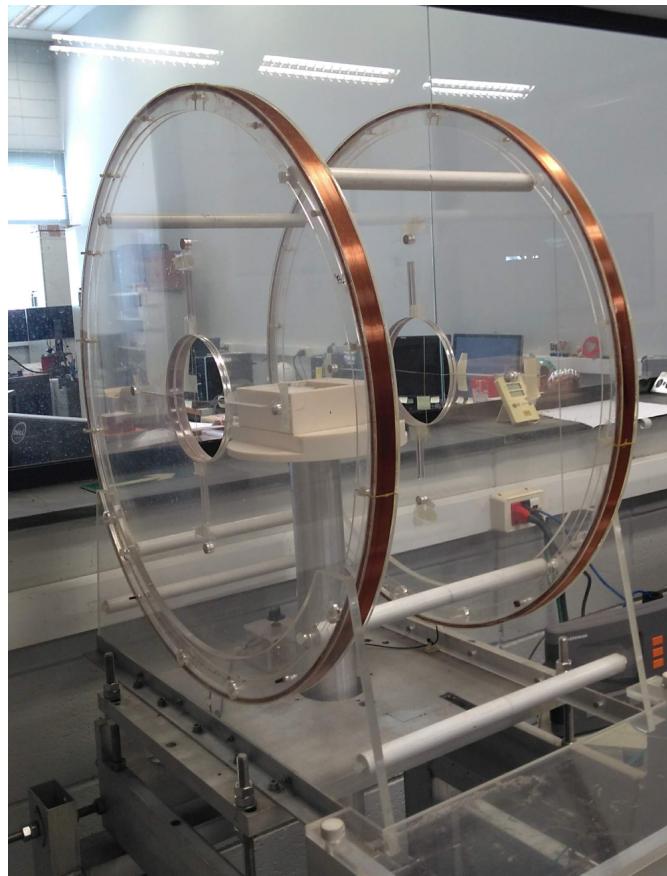


Figure 1: Sistema de caracterização com bobinas de Helmholtz.

## Método

A medida das três componentes da magnetização é feita em duas etapas: na primeira etapa alinha-se a direção da magnetização principal do ímã com o eixo das bobinas e mede-se a componente principal; na segunda etapa uma rotação de 90° em torno do eixo horizontal é aplicada ao bloco para medir as componentes secundárias, conforme apresentado nas figuras 2 e 3.

Todos as medidas foram realizadas com o bloco de ímã permanente 0001-S que tem 5 mm de espessura e foi comprado da Dailymag para o protótipo do ondulador Delta.

Em todas as medidas foi assumido o valor ideal para o volume do bloco de 1927.522 mm<sup>3</sup>, pois a balança de precisão que seria utilizada para determinação da massa e, consequentemente, do volume do bloco não estava funcionando corretamente.

Foram feitos testes para averiguar a repetibilidade da medida e sensibilidade em relação à erros de posicionamento do bloco.

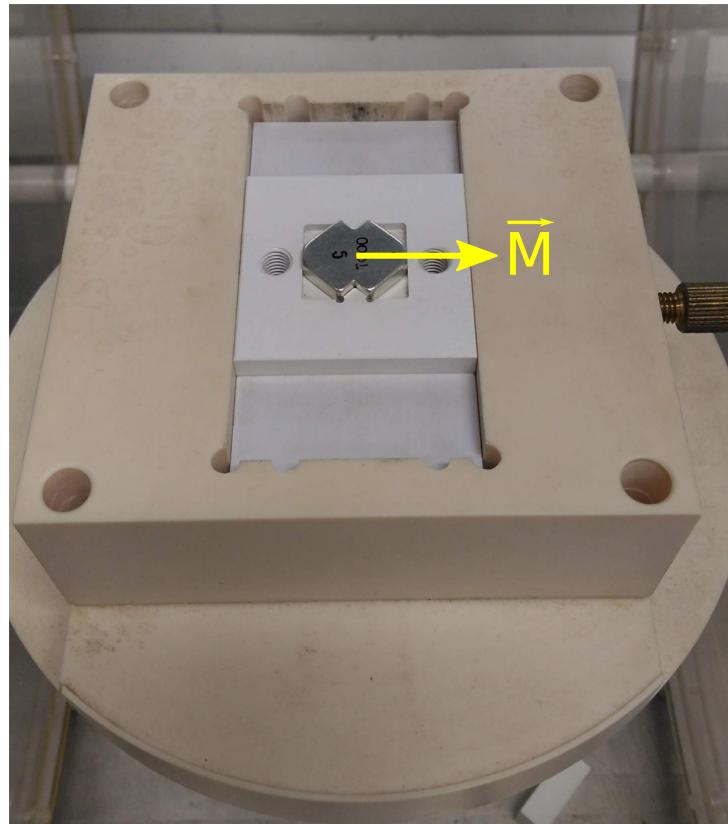


Figure 2: Primeira etapa: posicionamento do bloco para medição da componente principal da magnetização.

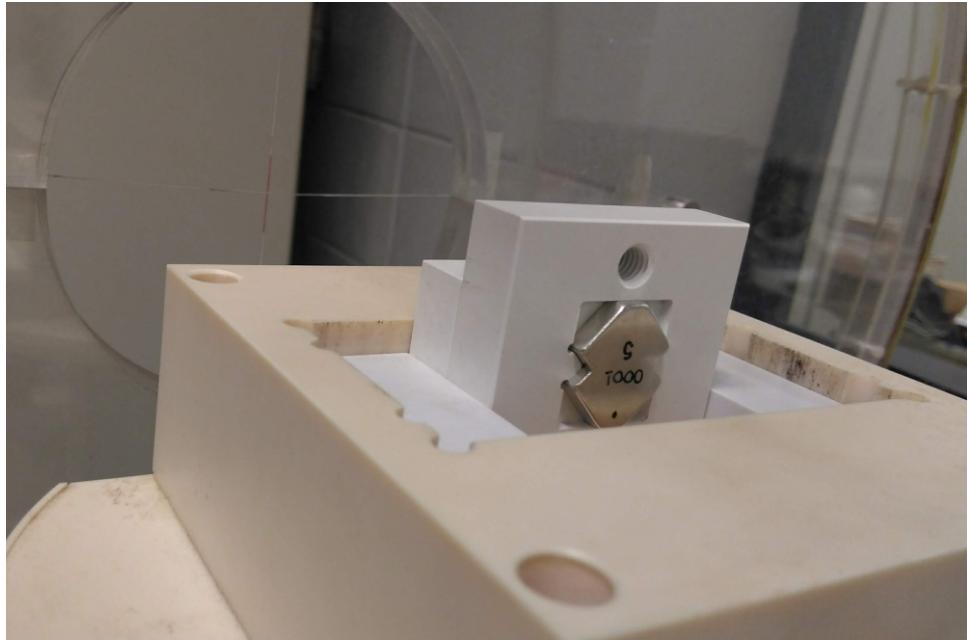


Figure 3: Segunda etapa: posicionamento do bloco para medição das componentes secundárias da magnetização.

## Medidas sem o bloco

Inicialmente foram feitas medidas sem nenhum bloco magnético. Os resultados, apresentados na tabela 1, indicam um offset de aproximadamente 10 G em ambas as direções.

Table 1: Resultados das medidas sem o bloco

Nº da Medida	$M_x$ [G]	$M_z$ [G]
1	-10 ± 6	-12.3 ± 0.9
2	-9 ± 3	-12.2 ± 0.9
3	-8 ± 5	-12.2 ± 2.1
4	-8 ± 6	-11.0 ± 1.6
5	-7 ± 2	-12.4 ± 1.0
6	-10 ± 8	-12.0 ± 0.7
7	-4 ± 6	-12.2 ± 1.9
8	-8 ± 3	-11.0 ± 0.6
9	-2 ± 6	-11.6 ± 0.8
10	-9 ± 10	-12.1 ± 1.1
<b>Média</b>	<b>-7</b>	<b>-12</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>3</b>	<b>1</b>

## Repetibilidade da medida

Para testar a repetibilidade, foi inicialmente feita uma série de 10 medidas consecutivas da magnetização principal sem alterar o posicionamento do bloco. Os resultados são mostrados na tabela 2. O desvio padrão destas medidas é de 0.4 G. O mesmo teste foi feito para as componentes secundárias da magnetização (tabela 3) e o desvio padrão neste caso é de aproximadamente 4 G.

Em seguida foram feitas medidas consecutivas das três componentes da magnetização, desta vez reposicionando o bloco magnético após cada medida. Os resultados são apresentados na tabela 4. O desvio padrão para as componentes  $M_x$  e  $M_z$  é de 3 G. No entanto, o desvio para a componente  $M_y$  é maior e a diferença entre os valores medidos pode chegar até 45 G, o que indica um problema na repetibilidade do posicionamento do bloco para a segunda etapa da medida (vide figura 3).

Table 2: Repetibilidade para a componente principal da magnetização

Medida	$M_z$ [G]
1	$13291.1 \pm 0.8$
2	$13291.0 \pm 0.8$
3	$13290.6 \pm 0.8$
4	$13290.5 \pm 0.9$
5	$13291.1 \pm 0.9$
6	$13291.2 \pm 0.6$
7	$13291.0 \pm 1.3$
8	$13291.5 \pm 0.7$
9	$13291.8 \pm 0.5$
10	$13291.6 \pm 0.8$
<b>Média</b>	13291.1
<b>Desvio Padrão</b>	0.4

Table 3: Repetibilidade para as componentes secundárias da magnetização

<b>Medida</b>	$M_x$ [G]	$M_y$ [G]
1	$704 \pm 6$	$-52.6 \pm 0.9$
2	$706 \pm 6$	$-52.2 \pm 1.1$
3	$704 \pm 9$	$-50.6 \pm 2.5$
4	$707 \pm 6$	$-51.5 \pm 0.7$
5	$716 \pm 9$	$-52.4 \pm 0.9$
6	$705 \pm 6$	$-51.7 \pm 1.3$
7	$703 \pm 4$	$-51.4 \pm 0.6$
8	$704 \pm 6$	$-51.1 \pm 0.9$
9	$708 \pm 4$	$-51.6 \pm 0.6$
10	$710 \pm 8$	$-51.6 \pm 0.9$
<b>Média</b>	707	-51.6
<b>Desvio Padrão</b>	4	0.5

Table 4: Repetibilidade das três componentes da magnetização, incluindo reposicionamento do bloco após cada medida

<b>Medida</b>	$M_x$ [G]	$M_y$ [G]	$M_z$ [G]
1	$712 \pm 2$	$-76.0 \pm 0.5$	$13294.6 \pm 1.0$
2	$707 \pm 6$	$-80.0 \pm 0.5$	$13293.4 \pm 1.4$
3	$710 \pm 5$	$-61.0 \pm 1.2$	$13291.5 \pm 1.2$
4	$706 \pm 3$	$-90.8 \pm 1.0$	$13289.9 \pm 0.9$
5	$712 \pm 5$	$-71.3 \pm 1.3$	$13290.2 \pm 0.7$
6	$709 \pm 9$	$-56.9 \pm 0.8$	$13290.7 \pm 0.8$
7	$708 \pm 4$	$-73.1 \pm 1.4$	$13297.3 \pm 0.9$
8	$704 \pm 9$	$-65.5 \pm 1.3$	$13297.1 \pm 0.7$
9	$713 \pm 11$	$-45.1 \pm 1.2$	$13296.3 \pm 1.1$
10	$710 \pm 7$	$-56.6 \pm 0.9$	$13296.4 \pm 1.4$
<b>Média</b>	709	-68	13294
<b>Desvio Padrão</b>	3	13	3

Diversas opções foram testadas para tentar resolver o problema no reposicionamento do bloco. A solução mais eficaz foi construir uma peça com um parafuso acoplado para manter o bloco na posição desejada durante a medida, como mostrado na figura 4. As

medidas de repetibilidade foram refeitas utilizando esse novo método de posicionamento; os resultados são apresentados na tabela 5. A maior diferença entre os valores medidos para a componente  $M_y$  neste caso foi de 25 G, quase duas vezes menor que erro observado sem a peça de apoio. A diferença entre os valores médios das duas tabelas (tabela 4 e tabela 5) pode estar relacionada com uma diferença de temperatura do bloco, que não estava sendo monitorada durante as medidas.

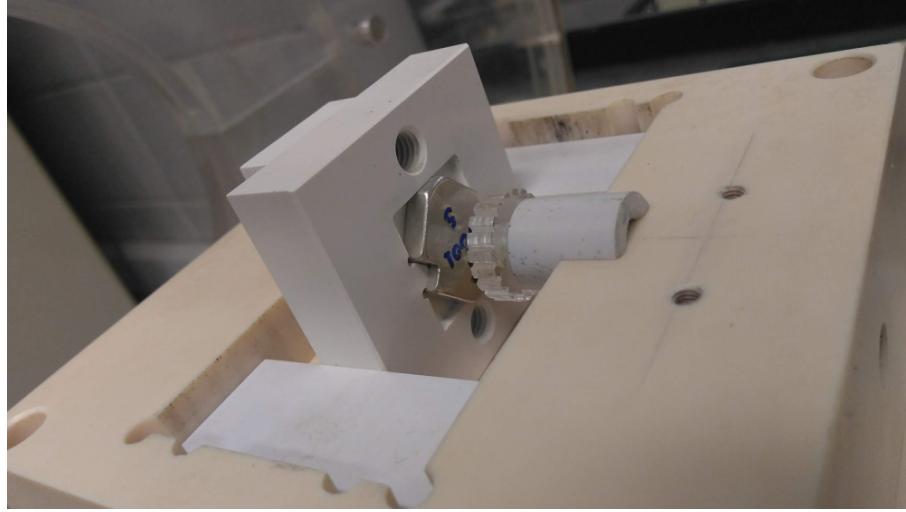


Figure 4: Novo método de posicionamento do bloco para a segunda etapa da medida.

Table 5: Repetibilidade das três componentes da magnetização, utilizando o novo método de posicionamento do bloco.

<b>Medida</b>	$M_x$ [G]	$M_y$ [G]	$M_z$ [G]
1	$693 \pm 7$	$-41.5 \pm 1.0$	$13288.7 \pm 1.2$
2	$693 \pm 5$	$-45.9 \pm 0.5$	$13288.5 \pm 1.9$
3	$694 \pm 8$	$-36.1 \pm 1.4$	$13288.1 \pm 1.0$
4	$695 \pm 5$	$-23.1 \pm 0.7$	$13288.5 \pm 0.4$
5	$696 \pm 5$	$-20.7 \pm 0.6$	$13288.2 \pm 0.8$
6	$691 \pm 7$	$-25.5 \pm 1.1$	$13288.1 \pm 0.9$
7	$696 \pm 9$	$-40.9 \pm 1.9$	$13288.0 \pm 0.8$
8	$693 \pm 8$	$-38.1 \pm 0.7$	$13287.6 \pm 0.8$
9	$696 \pm 7$	$-30.3 \pm 1.4$	$13286.5 \pm 0.9$
10	$696 \pm 5$	$-24.9 \pm 1.4$	$13286.9 \pm 0.9$
<b>Média</b>	694	-32	13287
<b>Desvio Padrão</b>	2	9	1

## Erro no ângulo inicial da medida

No início de cada medida o bloco magnético deve ser alinhado com o eixo das bobinas de Helmholtz, portanto, é preciso determinar previamente o pulso do encoder do motor que satisfaz essa condição.

A partir de um alinhamento simplificado foi determinado o valor de 132 para o pulso inicial do encoder. Para testar esse alinhamento e determinar a sensibilidade da medida à este erro foram feitas medidas variando a posição inicial do motor.

Foram feitas medidas apenas da componente principal para vários valores iniciais do pulso do encoder, como mostrado na figura 5. A partir do ajuste dos dados determinou-se que a componente principal atinge a amplitude máxima quando o trigger é ajustado para 129. Este valor é próximo do obtido previamente; a diferença corresponde à um erro angular de aproximadamente  $0.5^\circ$ , que pode ser decorrente tanto de erros no processo de alinhamento quanto a um erro na direção da magnetização do bloco.

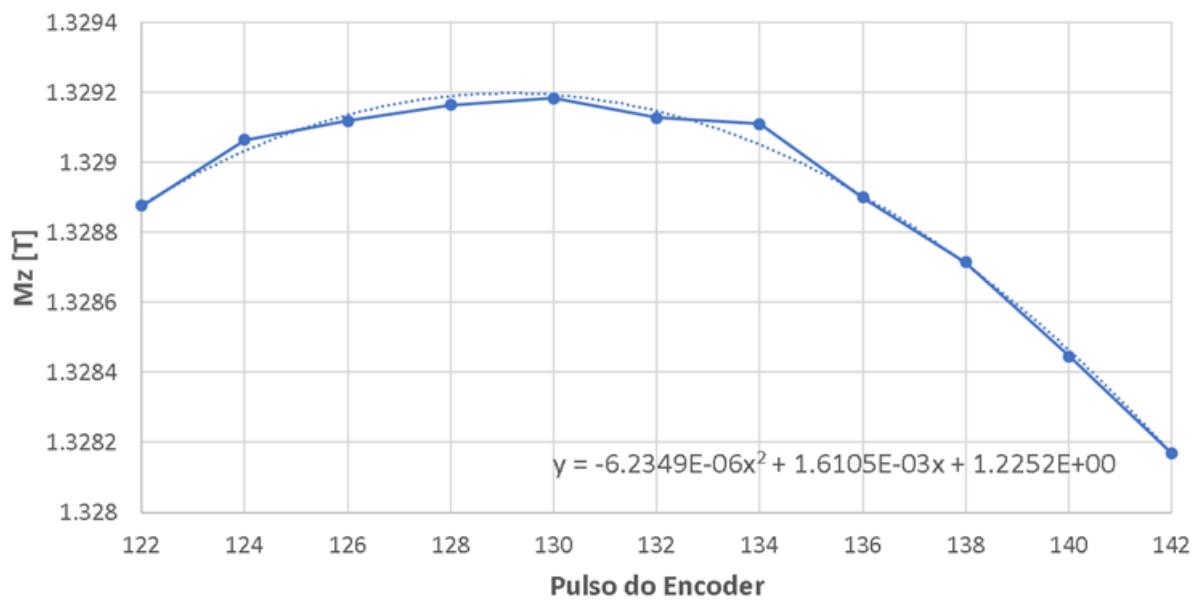


Figure 5: Componente principal da magnetização em função do pulso inicial do encoder. A linha pontilhada corresponde ao ajuste polinomial de ordem 2.

Em seguida foram feitas medidas das três componentes da magnetização para três valores de trigger diferentes (vide tabela 6). A variação total na amplitude de magnetização é de aproximadamente 160 G, ou seja, a sensibilidade da medida à erros no valor do trigger é próxima de 1.6 G/pulso.

Table 6: Resultados das medidas para diferentes valores de trigger

Trigger	$M$ [G]
182	$13154 \pm 10$
132	$13314 \pm 5$
82	$13159 \pm 5$

## Erro de posicionamento do bloco

Para testar a sensibilidade a erros de posicionamento do bloco foram realizadas medidas com o bloco deslocado em cada uma das direções.

A tabela 7 apresenta os resultados das medidas da magnetização principal do bloco com e sem deslocamentos. Conforme observado, o efeito de erros de posicionamento nas direções vertical e horizontal é desprezível. A sensibilidade à erros de posicionamento na direção do eixo das bobinas é de 2 G/mm.

Table 7: Medidas da magnetização principal  $M_z$  para diferentes posições do bloco

Posição do bloco	$M_z$ [G]	$\Delta M_z$ [G]
Sem deslocamento	$13295.2 \pm 0.6$	
Deslocamento de 10 mm na direção X	$13294.5 \pm 0.8$	-0.6
Deslocamento de 5 mm na direção Y	$13294.2 \pm 1.1$	-1.0
Deslocamento de 10 mm na direção Z	$13313.0 \pm 1.1$	17.8

O mesmo teste foi feito para verificar efeitos de deslocamento na medida da componente perpendicular  $M_x$ . Para realizar estas medidas o bloco foi rotacionado  $90^\circ$  em torno da direção vertical. Os resultados são mostrados na tabela 8, em todos os casos a variação observada foi menor que 1 G/mm.

Table 8: Medidas da magnetização  $M_x$  para diferentes posições do bloco

Posição do bloco	$M_x$ [G]	$\Delta M_x$ [G]
Sem deslocamento	$13300 \pm 3$	
Deslocamento de 10 mm na direção X	$13295 \pm 3$	-5
Deslocamento de 5 mm na direção Y	$13303 \pm 6$	3
Deslocamento de 10 mm na direção Z	$13291 \pm 7$	-9

## **Erro na determinação do volume do bloco**

Para a realização dos testes foi utilizado o valor teórico do volume do bloco magnético nos cálculos da magnetização, pois a acurácia da medida não era importante neste caso. No entanto, para caracterizar a magnetização do conjunto de blocos será necessário determinar o volume de cada um deles. O volume será obtido a partir de medidas da massa de cada bloco, assumindo um valor constante para a densidade do material. A balança que será utilizada para a pesagem dos blocos tem precisão de 0.001 g, porém, o campo magnético do bloco influencia as medidas. Fazendo medidas com o bloco em diferentes orientações em relação a balança foi observada uma diferença de até 0.01 g no valor medido. Esta incerteza corresponde a um erro de aproximadamente 10 G na amplitude da magnetização.

**Observação:** Variações no valor da densidade dos blocos não foram consideradas na estimativa do erro.

## **Estimativa dos erros da medida**

Para estimar o valor total dos erros da medida da magnetização dos blocos do Delta foi feito um cálculo simplificado somando os erros citados acima. Nesta estimativa foi assumido o valor de  $-0.0011/^\circ\text{C}$  para o coeficiente de temperatura dos blocos de NdFeB. Os valores obtidos são apresentados na tabela 9.

## **Conclusões**

O erro total estimado para a amplitude de magnetização, considerando um cenário pessimista em termos de alinhamento e controle da temperatura do sistema, é da ordem de 150 G, que corresponde à aproximadamente 1% do valor da amplitude de magnetização do bloco. Para fazer testes iniciais do algoritmo de sorting este valor é aceitável, no entanto, para as medidas oficiais o sistema precisará de melhorias. É possível, por exemplo, melhorar o sistema de posicionamento do bloco na segunda etapa da medida para obter uma maior repetibilidade, determinar de forma mais precisa o pulso de trigger, controlar ou compensar os efeitos de variação da temperatura, entre outros.

Table 9: Estimativa dos erros na medida da magnetização

Fontes de erros	
Offset	15 G
Erro de repetibilidade $M_x$ e $M_z$	5 G
Erro de repetibilidade $M_y$	25 G
Erro na determinação do volume	10 G
Erro de posicionamento	2 G/mm
Incerteza no trigger	1.6 G/mm
Variação da temperatura	15 G/°C

Valores considerados para as fontes de erros	
Erro de posicionamento	< 3 mm
Incerteza no trigger	< 5 pulsos
Variação da temperatura	< 2°C

Erro total estimado	
Componente $M_x$	< 80 G
Componente $M_y$	< 100 G
Componente $M_z$	< 80 G