



14 de março de 2020

Resultados dos testes com fio esticado na bancada Kugler

Grupo IMAS

Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, Campinas, Brasil

Este relatório apresenta os resultados das medidas feitas com o fio esticado na bancada Kugler. Estes testes foram feitos com o intuito de comparar resultados desse sistema de medida com os sistemas de sensor Hall e bobina girante, visto que estes dois últimos apresentam discrepâncias de até 1.7% nos valores para o campo integrado de um mesmo ímã.

1. Setup das medidas

As medidas foram feitas utilizando o dipolo de calibração eletromagnético (Figura 1), que apresenta uma homogeneidade alta, o que faz com que os resultados sejam menos sensíveis a erros de alinhamento do sistema. Este dipolo foi caracterizado inicialmente com o sensor Hall Senis 135-14-Y e em seguida com a versão do fio esticado para a bancada Kugler (Figura 3). A voltagem induzida no fio foi medida com um multímetro Keysight 3458A e também com um integrador digital FDI2056. Todas as medidas foram feitas utilizando a fonte de 1000 A (FAC_2P_DCDC_IMAS) após a atualização do firmware para a versão 1.23.

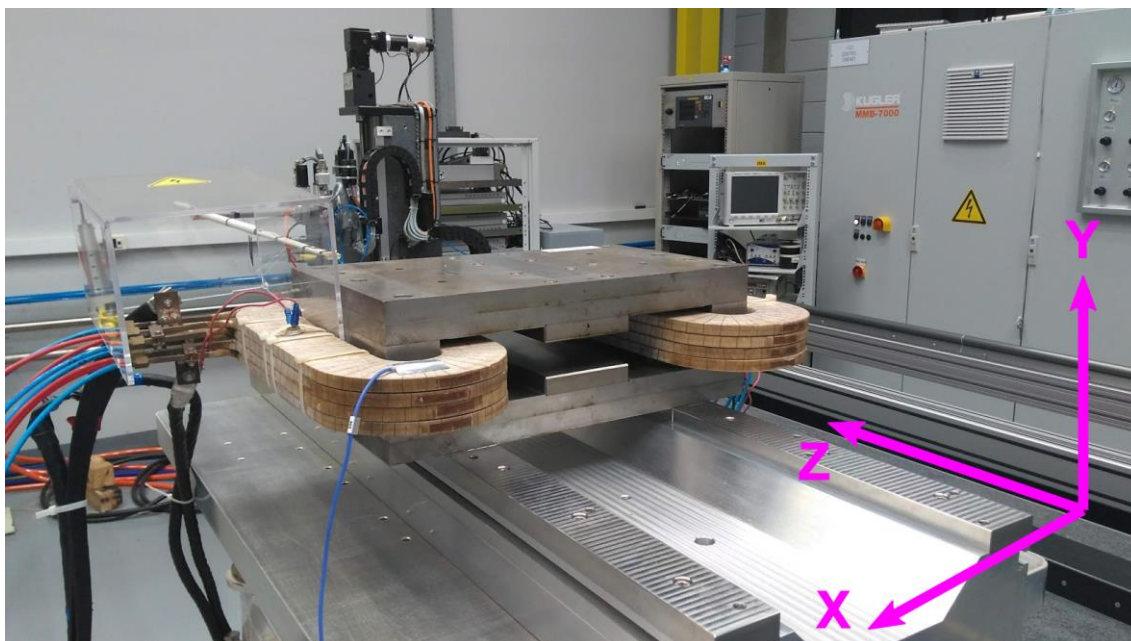


Figura 1 – Dipolo de calibração na bancada Kugler.

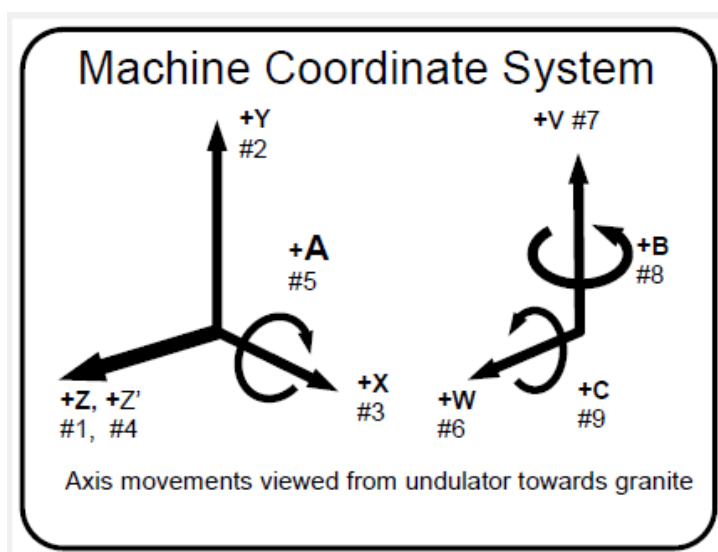


Figura 2 – Eixos de movimentação da bancada Kugler.

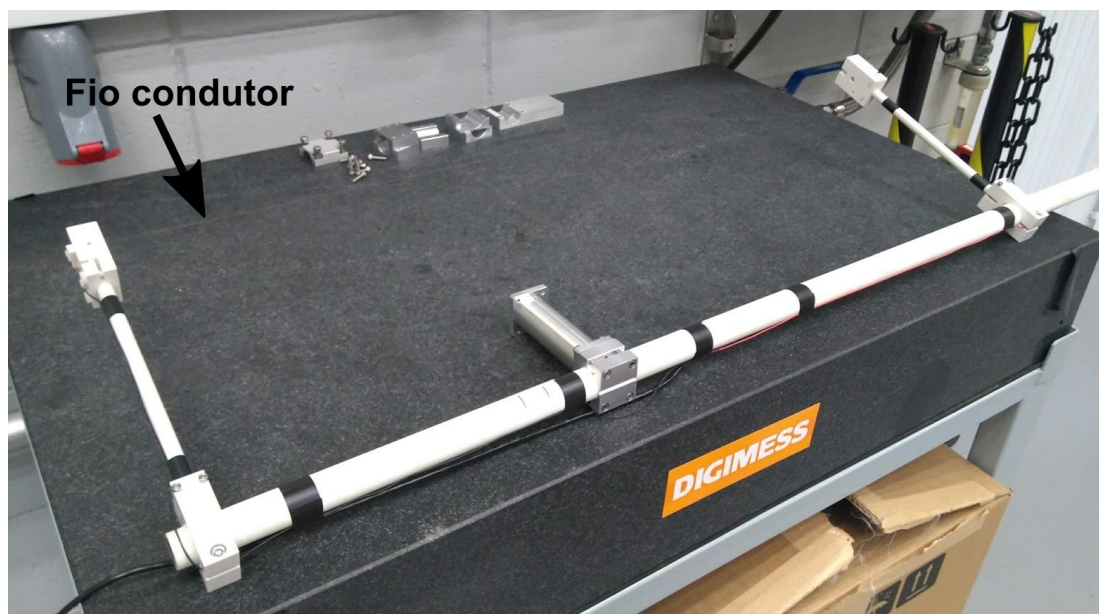


Figura 3 – Fio esticado utilizado nas medidas na bancada Kugler.

1.1. Curvas de desmagnetização, ciclagem e rampa de corrente

O dipolo foi inicialmente desmagnetizado, utilizando uma curva senoidal amortecida com amplitude de 350 A, frequência de 0.2 Hz, 15 ciclos e constante de amortecimento de 7.5 segundos. Antes de cada medida foi feita a ciclagem do imã utilizando uma curva senoidal quadrática amortecida com amplitude de 200 A, frequência de 0.2 Hz, 15 ciclos e constante de amortecimento de 7.5 segundos. A versão do firmware da fonte utilizada nas medidas já inclui o fator de correção na amplitude das curvas amortecidas. Os valores de K_p e K_i do PID da fonte foram ajustados para 0.048 e 0.6507, respectivamente. Os seguintes valores de corrente foram utilizados para a rampa:

	Corrente [A]
1	0
2	50
3	100
4	150
5	200
6	150
7	100
8	50
9	0
10	-50
11	-100
12	-150
13	-200
14	-150
15	-100
16	-50
17	0

2. Medidas com sensor Hall

2.1. Curva de calibração do sensor Hall

As medidas com sensor Hall são realizadas aferindo a voltagem induzida no sensor na presença de um campo magnético. A sensibilidade nominal do sensor Hall utilizado é de 5 V/T, com tolerância de 0.5%. Para obter resultados com maior acurácia é necessário calibrar a dependência da voltagem induzida com o campo magnético. A seguinte curva de calibração foi utilizada nas medidas:

$$B_y = 0.19894106 V_y + 1.949234825 \times 10^{-5} V_y^3$$

onde V_y é o valor da voltagem medida pelo sensor Hall, em Volts, e B_y corresponde ao valor do campo magnético, em Tesla. Essa curva foi obtida utilizando um equipamento de ressonância nuclear magnética (NMR Teslameter PT 2025); detalhes do procedimento de calibração serão disponibilizados em outro relatório.

2.2. Resultados das medidas com sensor Hall

Os resultados das medidas com o sensor Hall são apresentados na tabela abaixo. A discrepância máxima observada para o valor do campo integrado vertical no centro do ímã é de 0.06 %.

Corrente [A]	Campo Integrado Vertical [T.m]			
	M1	M2	M3	Média
50	0.04571	0.04569	0.04570	0.04570
100	0.09106	0.09101	0.09105	0.09104
150	0.13511	0.13505	0.13510	0.13509
200	0.17387	0.17396	0.17398	0.17394
150	0.13654	0.13657	0.13658	0.13656
100	0.09204	0.09206	0.09207	0.09206
50	0.04652	0.04652	0.04653	0.04652
-50	-0.04503	-0.04506	-0.04505	-0.04505
-100	-0.09038	-0.09043	-0.09043	-0.09041
-150	-0.13457	-0.13461	-0.13461	-0.13460
-200	-0.17396	-0.17393	-0.17394	-0.17394
-150	-0.13656	-0.13655	-0.13657	-0.13656
-100	-0.09203	-0.09203	-0.09204	-0.09203
-50	-0.04650	-0.04650	-0.04650	-0.04650

3. Medidas com o fio esticado

As medidas com o fio esticado consistem em mover um fio posicionado no interior de um ímã e aferir a tensão induzida neste fio. O campo integrado vertical pode ser obtido a partir de uma medida com deslocamento horizontal do fio usando a seguinte equação:

$$I_y = \frac{\int V dt}{\Delta x}$$

onde I_y é o valor do campo magnético vertical integrado, V é a voltagem induzida e Δx é o deslocamento do fio na direção horizontal. A integral da voltagem pode ser feita de forma numérica, integrando o sinal ao longo da posição e assumindo uma velocidade constante para o deslocamento do fio, como é feito nas medidas com o multímetro, ou obtida diretamente com um integrador digital.

3.1. Método de alinhamento do fio esticado

Com o sensor Hall é possível aferir o valor do campo magnético em cada posição, o que possibilita determinar o centro magnético e o alinhamento do ímã a partir dos resultados das medidas magnéticas. No caso do fio esticado, o processo de alinhamento é mais complicado, pois apenas o valor do campo integrado ao longo da direção do fio é obtido. Para alinhar o fio no interior do ímã foi utilizado um novo procedimento de alinhamento feito com medidas de condutividade, idealizado por Reinaldo Basilio.

Esse novo procedimento de alinhamento consiste em conectar uma das entradas do multímetro a um terminal do fio e conectar a outra entrada do multímetro ao núcleo do ímã. Em seguida um esquadro é colocado em um dos lados do polo do ímã, conforme mostrado na Figura 4. O fio é então movido ao longo da direção horizontal monitorando o valor da resistência medida pelo multímetro. Quando o fio encosta no esquadro o circuito é fechado e o multímetro registra um valor finito para a resistência. Repetindo o mesmo procedimento do outro lado do ímã é possível alinhar o fio em relação ao polo.



Figura 4 - Foto do procedimento de alinhamento do fio esticado dentro do dipolo de calibração.

Este procedimento de alinhamento foi definido no dia em que as medidas estavam sendo realizadas e a análise dos dados foi feita de forma improvisada utilizando recursos já disponíveis no software de medidas. Os dados de resistência do multímetro foram coletados a uma taxa de 2 Hz e o fio foi movimentado com velocidade baixa, de 0.05 mm/s, o que resultou numa precisão para a posição de aproximadamente 50 μm . No entanto, coletando os dados do multímetro a uma taxa mais alta e garantindo o sincronismo entre as medidas de posição e resistência com um pulso de trigger deve ser possível obter uma precisão ainda maior com esse processo de alinhamento.

3.2. Resultados das medidas com fio esticado e multímetro

Os primeiros testes com o fio esticado foram feitos com a direção horizontal do ímã paralela ao eixo X da bancada Kugler, ou seja, as medidas foram realizadas variando a posição X da bancada. Os resultados para a medida de rampa nesta configuração, utilizando uma velocidade de 1.5 mm/s são apresentados na Figura 5. Conforme observado, o nível de ruído nas medidas é muito alto; flutuações de até 200 μV em torno do valor médio foram observadas, enquanto o nível de ruído obtido com o fio parado é menor que 10 μV .

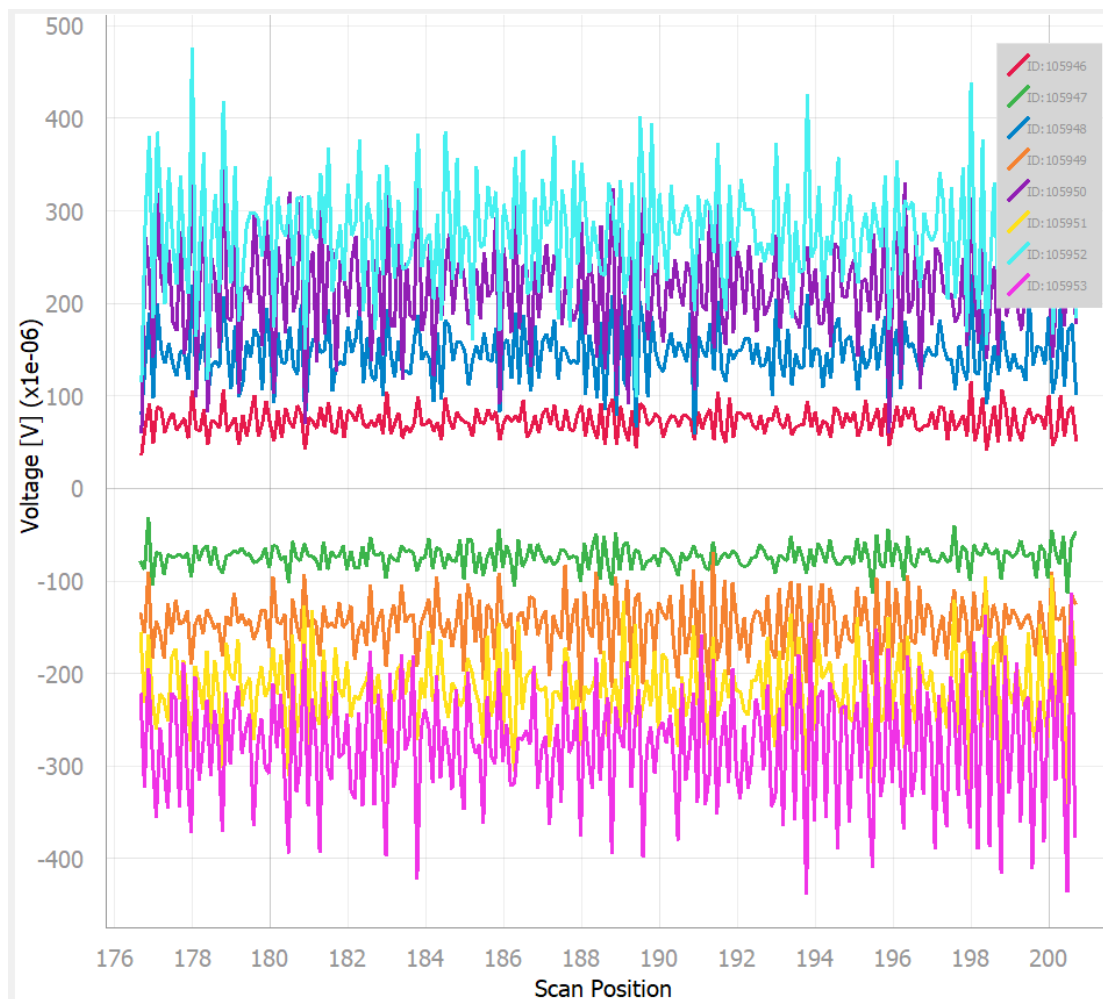


Figura 5 - Tensão induzida no fio esticado nas medidas da rampa de corrente do dipolo de calibração utilizando o eixo X da bancada Kugler. Cada par de curvas consecutivas corresponde à medidas para a mesma corrente no sentido positivo e no sentido negativo do deslocamento do eixo.

Como o sinal induzido no fio é proporcional a velocidade, foram realizadas medidas com a corrente do ímã fixa em 200 A, usando três valores distintos de velocidade: 1, 2 e 3 mm/s (a velocidade máxima permitida para os deslocamentos no eixo X da bancada é de 10 mm/s). Os resultados são apresentados na Figura 6.

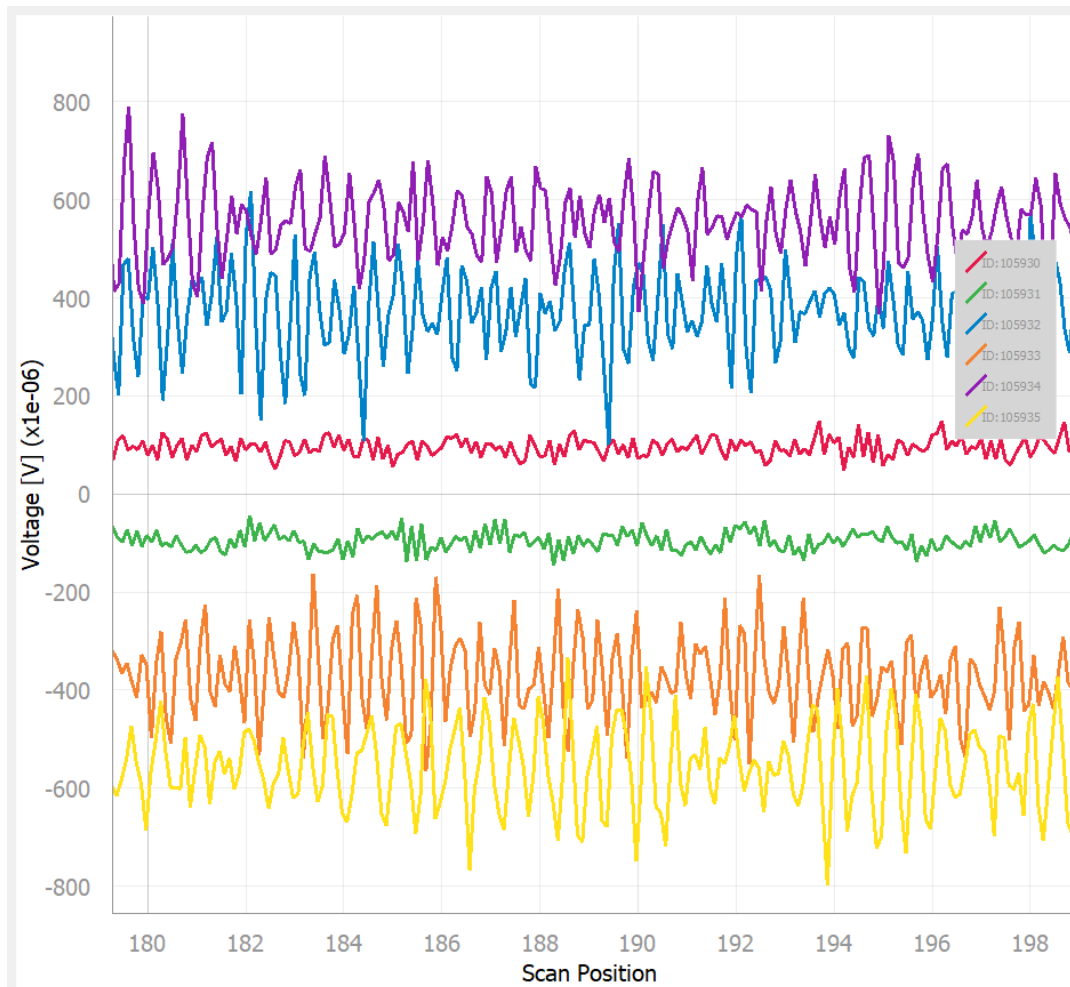


Figura 6 - Tensão induzida no fio esticado para o dipolo de calibração com corrente de 200 A, utilizando o eixo X da bancada Kugler, variando a velocidade de medida de 1 mm/s até 3 mm/s.

Embora a amplitude do sinal aumente com o aumento da velocidade, o nível de ruído não melhora. Para testar se esse ruído era decorrente de erros na movimentação da bancada foi realizado um teste inclinando a haste do fio esticado 10° em torno do eixo vertical (ângulo B) e fazendo a movimentação do fio utilizando o eixo principal da bancada (eixo Z), cuja movimentação é bem mais precisa e pode ser feita com velocidade de até 100 mm/s. Os resultados são mostrados na Figura 7.

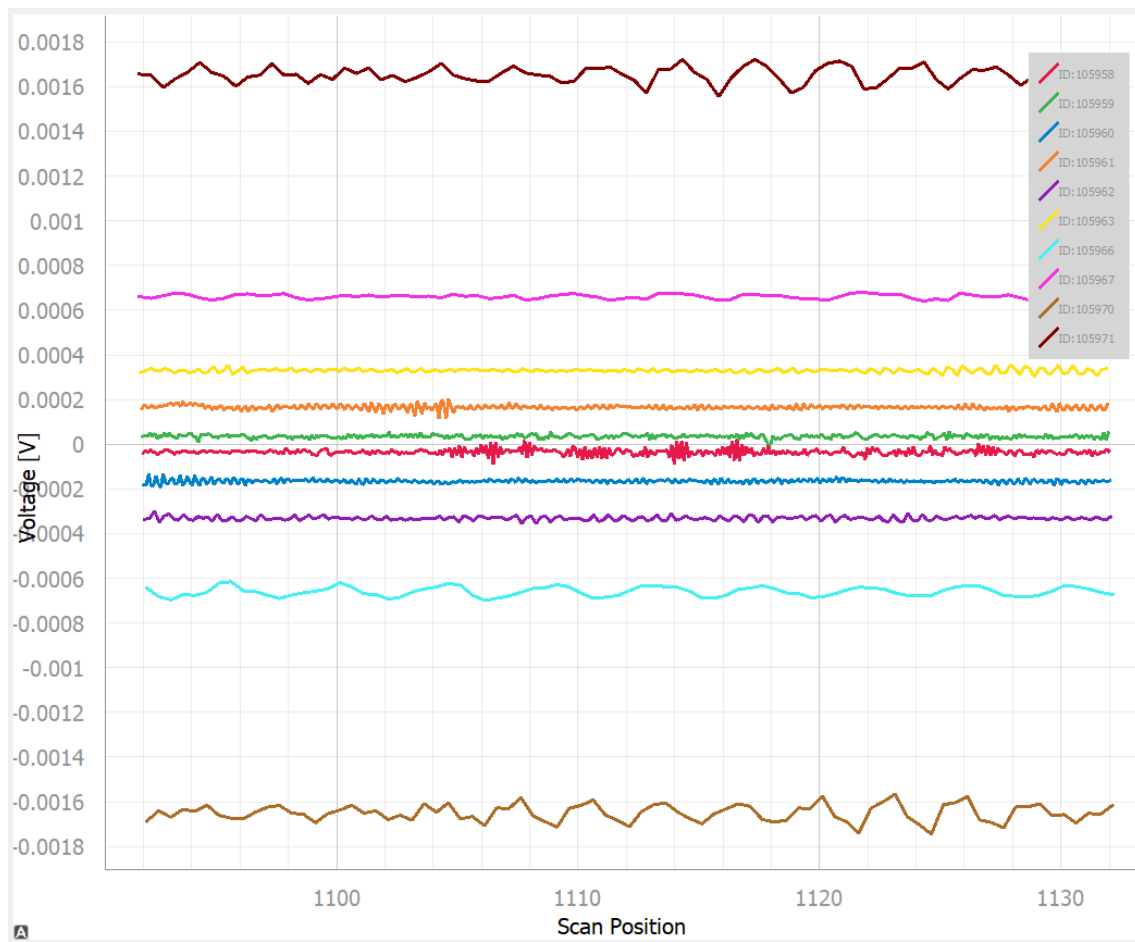


Figura 7 - Tensão induzida no fio esticado para o dipolo de calibração com corrente de 200 A utilizando o eixo Z da bancada Kugler variando a velocidade de medida de 1 mm/s até 50 mm/s.

Como pode ser observado na Figura 7, o nível de ruído é bem menor para o sinal induzido no fio com movimentações na direção Z, indicando que os erros observados anteriormente estão relacionados à instabilidades na movimentação do fio no eixo X. Por esse motivo, decidiu-se rotacionar o dipolo 90° em torno da direção vertical para realizar as medidas utilizando o eixo Z da bancada, conforme mostrado na Figura 8.

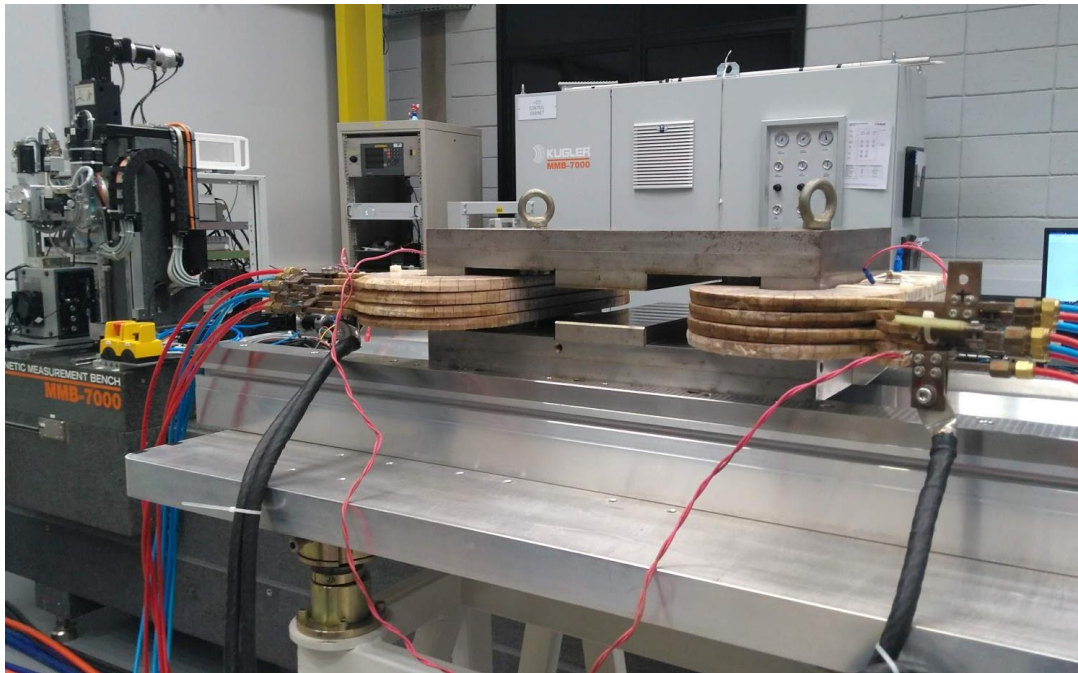


Figura 8 - Dipolo de calibração rotacionado 90° em torno da direção vertical.

Os resultados das medidas de rampa de corrente após a rotação do dipolo, para uma velocidade de 10 mm/s, são apresentados na Figura 9 e na tabela a seguir. Na figura é possível observar uma piora no ruído com o aumento da corrente no ímã; esse efeito pode ser decorrente da vibração do fio devido a ação do campo magnético. A comparação entre os valores medidos com o fio esticado e com o sensor Hall também é mostrada na tabela. A diferença entre os resultados obtidos com os dois sistemas é de aproximadamente 6.6%. O erro de repetibilidade para o valor do campo integrado nas medidas com o fio esticado é de 0.2%.

Corrente [A]	Sentido do deslocamento	Campo integrado [T.m]	Diferença com o valor medido com sensor Hall [%]
50	Positivo	0.04876	6.69
50	Negativo	0.04872	6.61
100	Positivo	0.09708	6.64
100	Negativo	0.09696	6.50
150	Positivo	0.14393	6.55
150	Negativo	0.14387	6.50
200	Positivo	0.18545	6.62
200	Negativo	0.18533	6.55

Diversos testes foram feitos para tentar determinar o que causou essa discrepância entre os dois sistemas, como variar a velocidade e os parâmetros de medida do multímetro. No entanto não conseguimos determinar a fonte desses erros. Para tentar obter melhores resultados decidimos coletar os dados da tensão induzida com um integrador digital.

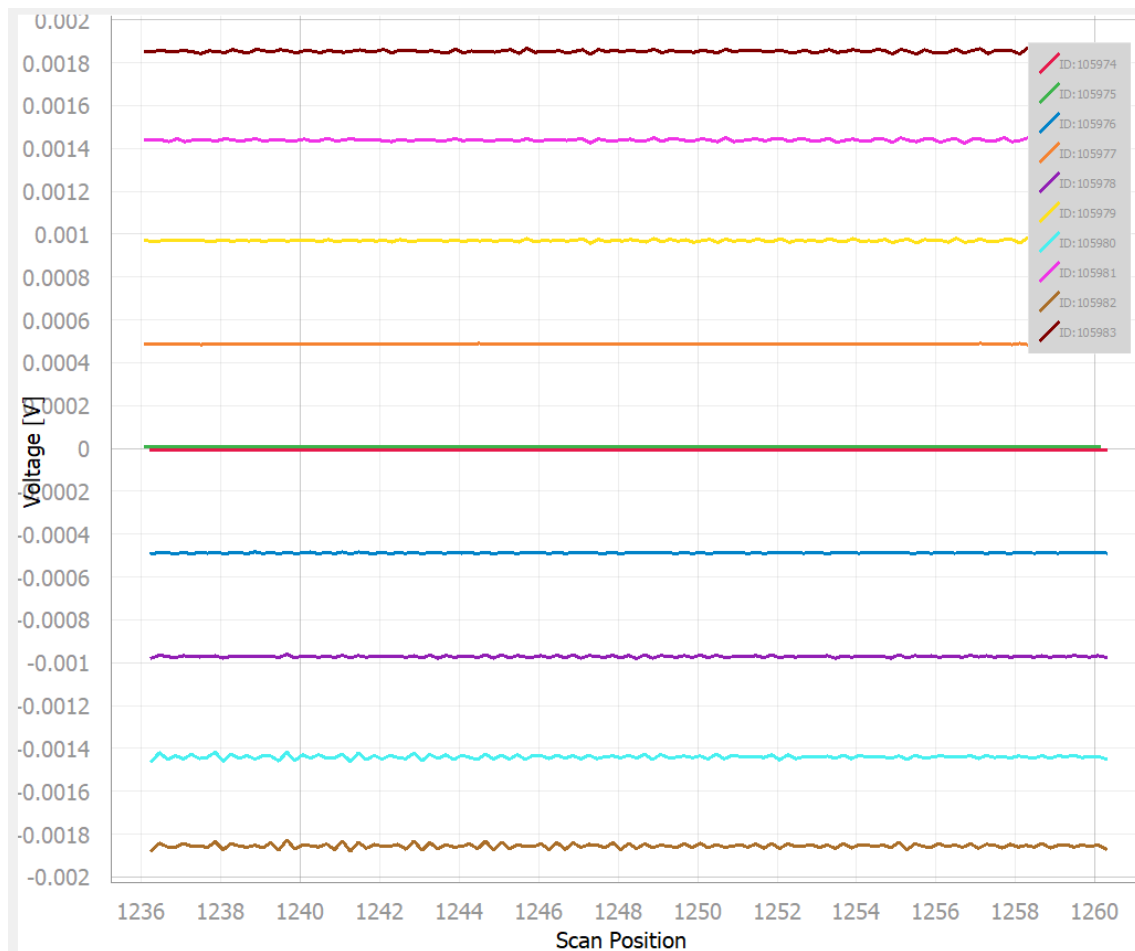


Figura 9 - Tensão induzida no fio esticado nas medidas da rampa de corrente do dipolo de calibração utilizando o eixo Z da bancada Kugler.

3.3. Resultados das medidas com fio esticado e integrador digital

A vantagem de utilizar um integrador digital nas medidas com o fio esticado é que os resultados ficam independentes da velocidade, já que a voltagem induzida é integrada no intervalo de tempo entre os pulsos de trigger, que são determinados pela posição do encoder. No entanto foi verificada uma dependência nos resultados com o valor do ganho configurado no equipamento, como mostrado na tabela a seguir. Além disso, os resultados são diferentes para as movimentações nos sentidos positivo e negativo do eixo. Essa diferença pode ser decorrente dos valores de offset do integrador para cada ganho. O procedimento de calibração do equipamento deveria corrigir esse problema, o que não foi observado.

Ganho do Integrador	Campo Integrado [T.m]		Diferença entre sentido positivo e negativo [%]
	Deslocamento no sentido positivo	Deslocamento no sentido negativo	
1	0.18695	0.17719	5.2
2	0.23192	0.13947	39.9
4	0.21126	0.16628	21.3
5	0.20996	0.16939	19.3
10	0.20641	0.17849	13.5
20	0.20236	0.18450	8.8
40	0.19987	0.19047	4.7
50	0.19998	0.19150	4.2
100	0.20048	0.19611	2.2

Para fazer a medida da rampa de corrente foi selecionado o ganho 100, que apresentou a menor discrepância entre os valores medidos nos dois sentidos de deslocamento do fio. Para aumentar a amplitude do sinal, a velocidade da medida foi alterada de 10 mm/s para 100 mm/s. Nesta configuração a diferença média entre os valores da ida e da volta é de 0.8%. Os resultados para a rampa de corrente e a comparação com os resultados do sensor Hall são apresentados na Figura 10 e na tabela abaixo. A diferença média entre as medidas com o fio esticado e com o sensor Hall é de aproximadamente 10%.

Corrente [A]	Campo Integrado [T.m]	Diferença com o valor medido com sensor Hall [%]
50	0.05181	13.4
100	0.10050	10.4
150	0.14766	9.3
200	0.18910	8.7
150	0.14914	9.2
100	0.10166	10.4
50	0.05283	13.5
-50	-0.04912	9.0
-100	-0.09966	10.2
-150	-0.14726	9.4
-200	-0.18977	9.1
-150	-0.14943	9.4
-100	-0.10152	10.3
-50	-0.05087	9.4

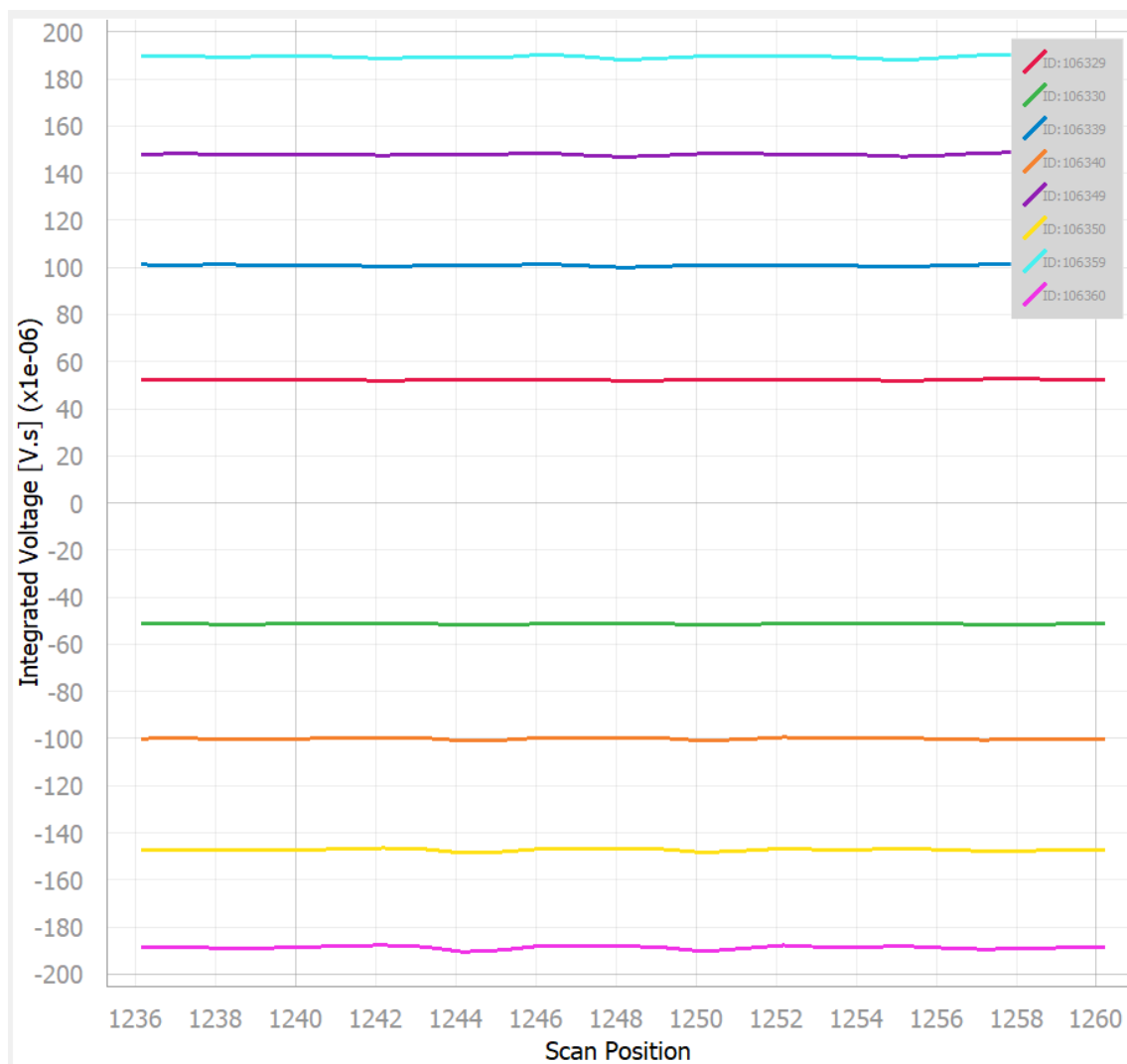


Figura 10 – Voltagem integrada em função da posição para a rampa de corrente do dipolo de calibração, medida com o integrador digital.

4. Defeitos nos equipamentos

Durante a instalação do integrador na bancada foram encontrados os seguintes defeitos nos equipamentos utilizados:

- **Trigger Box:** O sinal de trigger da bancada no sistema para medidas com sensores Hall precisa ser utilizado em três multímetros, um para cada um dos três sensores que medem o campo magnético nas direções X, Y e Z. Para enviar o sinal é utilizada uma caixa com uma entrada e três saídas, chamada de trigger box (vide Figura 11). O circuito dentro dessa caixa está dividindo a tensão do pulso de trigger que é 3.3 V entre as três saídas, o que deixa a voltagem do sinal muito baixa. Portanto não foi possível utilizar uma das saídas para enviar o sinal de trigger para o integrador; a caixa precisou ser removida para execução das medidas.
- **Display do integrador:** O display do integrador FDI2056A com número de série 1109 00117837 00005 não está funcionando corretamente. O valor do ganho não é alterado quando um novo valor de ganho é configurado e o LED indicador do pulso de trigger não está funcionando. Deve ser verificado se o problema é apenas com o display ou se a aquisição de dados também apresenta defeitos. Nas medidas apresentadas neste relatório foi utilizado o integrador com número de série 0416 00258483 00002.

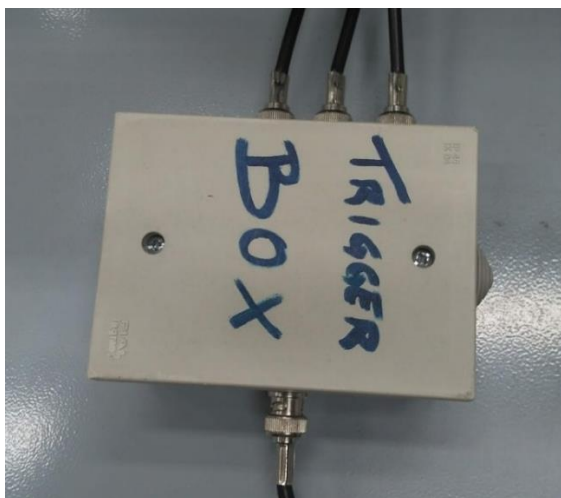


Figura 11 – Trigger box usada para enviar o pulso de trigger da bancada para os multímetros.

5. Conclusões

A diferença média entre os valores para o campo integrado do dipolo de calibração obtidos com o fio esticado usando o multímetro e com o sensor Hall são de aproximadamente 6.6%. Utilizando o integrador digital, essa discrepância aumenta ainda mais, ficando próxima de 10%. No entanto os resultados dos testes apresentam diversas inconsistências e, portanto, não podem ser utilizados como crosscheck entre os resultados das medidas com sensor Hall e bobina girante. Uma sugestão para tentar melhorar o sistema de medidas com o fio esticado é utilizar uma bobina com várias voltas no lugar do fio para aumentar a amplitude do sinal. Outro fator que deve ser testado é aumentar a distância entre os cabos de retorno da bobina e o ímã.