



11 de março de 2020

Relatório do processo de calibração do raio da Bobina Girante do Sirius – SBG-3 e SBG-4

Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, Campinas, Brasil

Grupo IMAS

Neste relatório são apresentados os resultados dos testes realizados para calibração do raio médio equivalente da Sirius Bobina Girante (SBG) modelo 3 e 4 cujo raio nominal é 13 mm. Para a realização do processo utilizou-se a bancada da bobina girante juntamente com seus subsistemas.

Relatório do processo de calibração do raio da Bobina Girante do Sirius – SBG-3 e SBG-4

Resumo: Baseando-se no artigo “*In-situ calibration of rotating sensor coils for magnet testing*” - P. Arpaia, M. Buzio, G. Golluccio and L. Walckiers” definiremos o raio médio equivalente da bobina para medir o campo integrado a partir de um quadrupolo de calibração. O método é destinado a aumentar a exatidão da bobina girante quando o comprimento da bobina é maior que o comprimento do ímã, explorando diretamente medidas do campo magnético e do deslocamento mecânico. O teste consiste em, num campo quadrupolar, promover um deslocamento Δz entre o eixo magnético e o eixo de rotação da bobina que dará origem a um componente de dipolo na expansão em série do campo medido [1]. Se os termos dipolar, quadrupolar e o deslocamento Δz forem medidos, os parâmetros de calibração (raio equivalente ao longo do comprimento do ímã de medição) podem ser determinados analiticamente.

$$B(z) = \sum_{n=1}^{+\infty} C_n \left(\frac{z}{R_{ref}} \right)^{n-1}, \quad C_n = A_n i + B_n \quad [1], [2]$$

Assume-se, no campo magnético estático, o fluxo radial ϕ , interceptado pela bobina girante imersa no campo em função do ângulo de rotação θ da bobina. A análise de Fourier da distribuição de fluxo permite obter os parâmetros de campo expressos em termos dos coeficientes harmônicos [2]. O conteúdo harmônico de campo é proporcional a Transformada Discreta de Fourier (DFT) com coeficientes ψ_n do fluxo da amostra θ_k resultante da integração da tensão entre duas posições angulares durante a rotação da bobina, onde N é o número de pontos angulares por volta [3].

$$\Psi_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Phi_k e^{kin \frac{2\pi}{N}}, \quad [3]$$

Mantendo o ímã na mesma posição, uma primeira rotação da bobina é realizada para avaliar o fluxo resultante dos componentes de quadrupolo e dipolo (ψ_2 e ψ_1 , respectivamente) na posição inicial X_0 . Então, um deslocamento é aplicado à bobina, a medição de fluxo é repetida e o $\Delta\psi_1$ e ψ_2 são utilizados na expressão [4] para calcular os parâmetros de calibração R .

$$R = -\frac{\Delta_x \Psi_2}{\Delta\psi_1} \quad [4]$$

Método de calibração:

1. Variação longitudinal e transversal com quadrupolo de magneto permanente

Foram executados dois tipos de procedimentos para determinar o raio médio da bobina. Primeiramente, utilizou-se um quadrupolo de calibração de magneto permanente de 12 blocos (45.88 T/m segundo simulação 2D ≈ 2.7528 T), transladando-o longitudinalmente ao longo do comprimento do berço dividido em 4 partes (-180 mm, -90 mm, 0 mm, 86 mm, 172 mm), onde a posição -180 mm representa a posição longitudinal do berço referente ao mancal do lado B e a posição longitudinal de 172 mm representa o mancal de lado A (vide Figura 1).

Para cada posição longitudinal, o eixo de giro da bobina foi deslocado transversalmente (Δz) em posições nominais de 3 mm, 5 mm, 7 mm e 10 mm ao longo do eixo X magnético. Os deslocamentos transversais Δz foram medidos através dos encoders lineares Heidenhain ND 780 de 0.1 μm de resolução e as posições longitudinais foram estimadas dentro de um erro de ± 0.5 mm. O erro angular e o alinhamento de centro foram pré-determinados (3.0e-5 rad, 20 μm em X, -4 μm em Y) e não afetam o procedimento de calibração.

2. Variação longitudinal com dipolo de magneto permanente

Um dipolo de calibração de magneto permanente de 12 blocos (1.045 T segundo simulação 2D ≈ 0.0627 T.m) foi transladado longitudinalmente ao longo do comprimento do berço a fim de estimar a dependência do raio da bobina com a longitudinal.

3. Variação transversal da bobina na abertura do quadrupolo do Booster (@r = 17.5 mm)

De posse de um quadrupolo BQF do Booster, foi executado o mesmo procedimento do item 1, dessa vez utilizando um quadrupolo com melhor design mecânico, multipolos conhecidos, campo integrado e raio de abertura conveniente.

Resultados:

1. Variação longitudinal com quadrupolo de magneto permanente e variação transversal da bobina sob o eixo X

SBG-4:

Tabela 1: Raio calculado a partir das posições transversais para cada posição longitudinal.

| Longitudinal Position [mm] | Nominal Horizontal Shift [mm] | Encoder Reading A [mm] | Encoder Reading B [mm] | Average Horizontal shift [mm] | Calculated Radius [mm] |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|
| -180.0000 | 3.0000 | 3.0634 | 3.1045 | 3.0840 | 12.9253 |
| | 5.0000 | 5.0623 | 5.1026 | 5.0825 | 12.9259 |
| | 7.0000 | 7.0635 | 7.1068 | 7.0852 | 12.9370 |
| | 10.0000 | 10.0037 | 10.0054 | 10.0046 | 12.9389 |
| -90.0000 | 3.0000 | 3.0636 | 3.1054 | 3.0845 | 12.9200 |
| | 5.0000 | 5.0641 | 5.1041 | 5.0841 | 12.9366 |
| | 7.0000 | 7.0632 | 7.1064 | 7.0848 | 12.9391 |
| | 10.0000 | 10.0101 | 10.0088 | 10.0095 | 12.9320 |
| 0.0000 | 3.0000 | 3.0648 | 3.1074 | 3.0861 | 12.9637 |
| | 5.0000 | 5.0636 | 5.1082 | 5.0859 | 12.9636 |
| | 7.0000 | 7.0641 | 7.1073 | 7.0857 | 12.9651 |
| | 10.0000 | 10.0008 | 10.0029 | 10.0019 | 12.9583 |
| 86.0000 | 3.0000 | 3.0633 | 3.0985 | 3.0809 | 13.0116 |
| | 5.0000 | 5.0632 | 5.0982 | 5.0807 | 12.9957 |
| | 7.0000 | 7.0624 | 7.0978 | 7.0801 | 12.9975 |
| | 10.0000 | 10.0074 | 10.0070 | 10.0072 | 12.9693 |
| 172.0000 | 3.0000 | 3.0626 | 3.0959 | 3.0793 | 13.0413 |
| | 5.0000 | 5.0622 | 5.0968 | 5.0795 | 13.0201 |
| | 7.0000 | 7.0649 | 7.0967 | 7.0808 | 13.0121 |
| | 10.0000 | 10.0011 | 10.0018 | 10.0015 | 12.9836 |

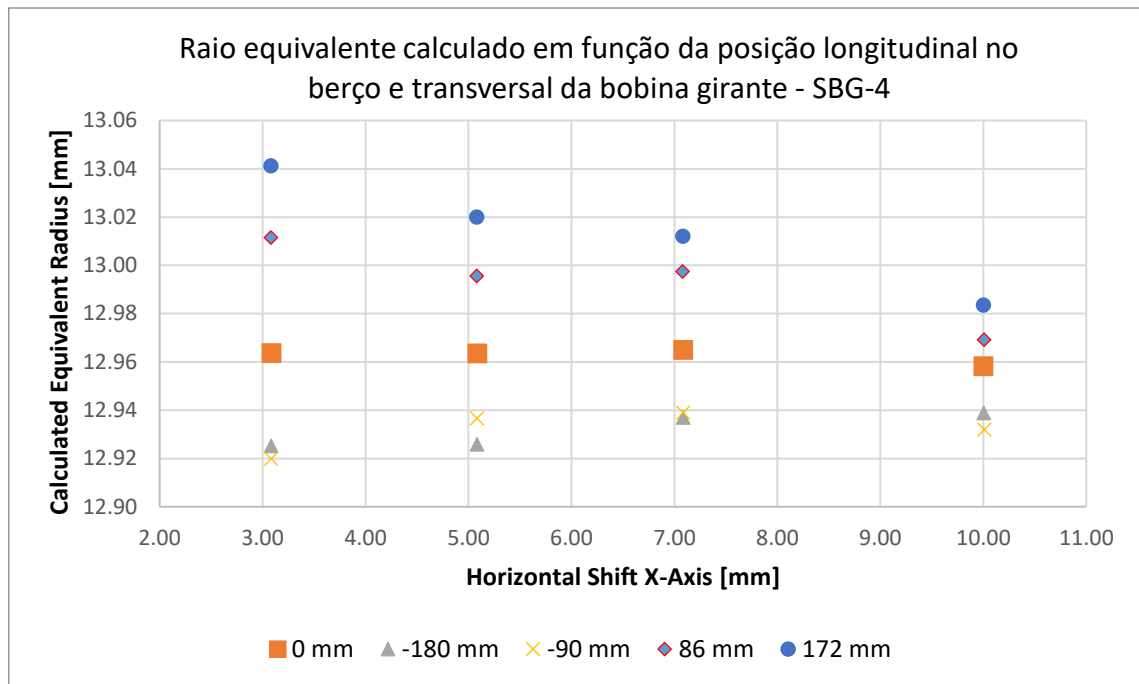


Tabela 2: Média por deslocamento.

| Avg. Shift [mm] | R mean [mm] | std [mm] |
|--------------------|-------------|----------|
| 10.0041 | 12.956434 | 0.021252 |
| 7.0696 | 12.970172 | 0.033903 |
| 5.0688 | 12.968377 | 0.039571 |
| 3.0693 | 12.972382 | 0.053213 |

Tabela 3: Média para posição longitudinal.

| Nominal Longitudinal Position [mm] | R mean [mm] | std [mm] |
|---|-------------|----------|
| 0.00 | 12.962667 | 0.002985 |
| -90.00 | 12.931935 | 0.008457 |
| 172.00 | 13.014297 | 0.023897 |
| -180.00 | 12.931791 | 0.007195 |
| 86.00 | 12.993515 | 0.017652 |

Conclusão: Nota-se que há uma dependência do valor calculado do raio com o deslocamento da bobina no quadrupolo de magneto permanente. Não obstante, a precisão na determinação do deslocamento transversal também tem relevância no resultado do cálculo. Para verificação, no método 3, refez-se o teste adotando o quadruplo do Booster para a calibração e realizando ajustes mais precisos na posição dos mancais A e B com auxílio do encoder ND 780.

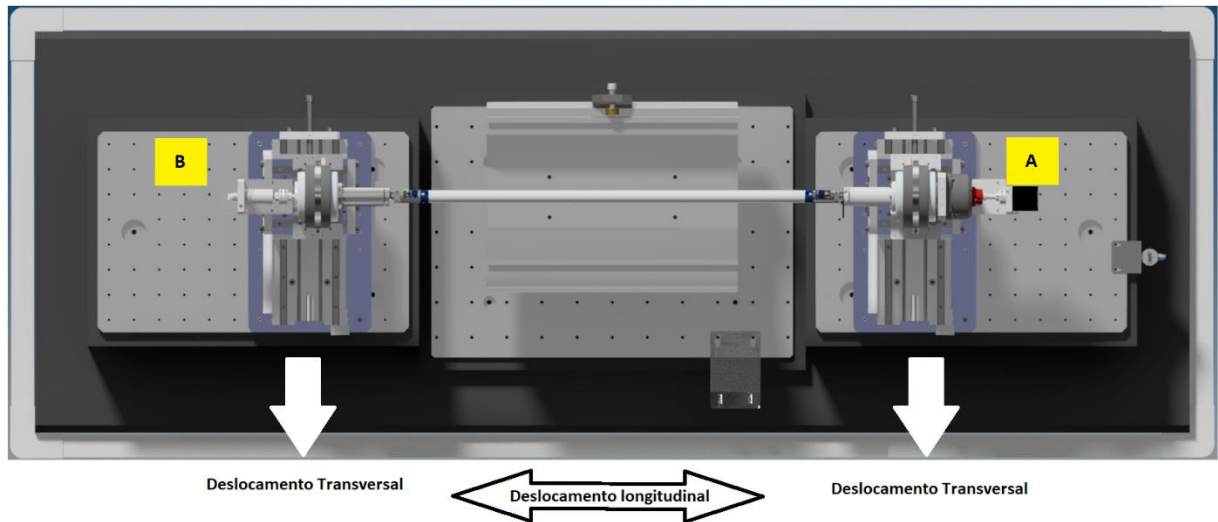


Figura 1: Esquema 3D da bancada da bobina girante com seus eixos de movimentação e mancais lado A e lado B.

Portanto, para este ensaio, o raio médio calculado para o SBG-4 foi de **12.967 mm \pm 0.006 mm** usando o quadrupolo de magneto permanente.

2. Variação longitudinal com dipolo de magneto permanente - SBG-4:

O termo de dipolo é diretamente proporcional ao raio da bobina, logo a variação dR com relação ao raio nominal R, que está ligada à parte integral no comprimento do dipolo pode ser determinada pela expressão:

$$dR = \frac{(I_m - I_r)R}{I_r}$$

Onde I_r é campo integrado da componente normal e corresponde à média sobre todas as posições longitudinais, I_m o campo integrado normal e R o raio nominal.

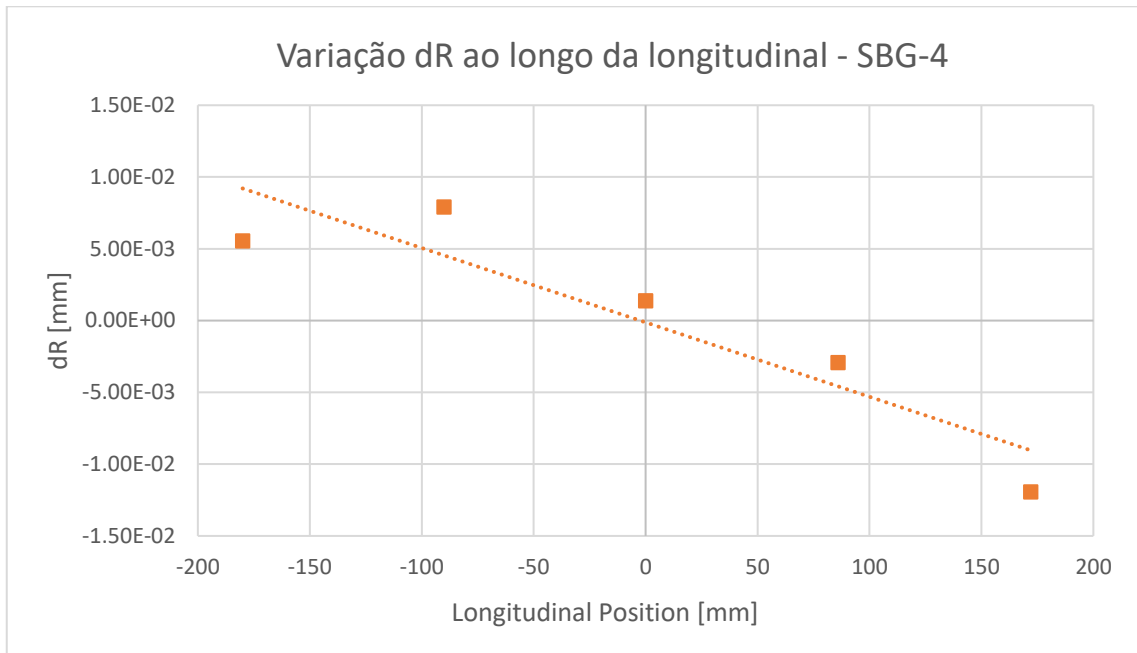


Figura 2: Variação do raio da bobina medida através do campo dipolar em função da posição longitudinal do dipolo sobre o berço.

Tabela 4: Dipolo Normal Integrado e variação dR.

| Longitudinal position [mm] | Dipolo integrado avg.L.N _n (T/m ⁿ⁻²) | dR [mm] |
|----------------------------|---|------------|
| -180.0 | 5.802E-02 | 5.559E-03 |
| -90.0 | 5.803E-02 | 7.906E-03 |
| 0.0 | 5.799E-02 | 1.372E-03 |
| 86.0 | 5.798E-02 | -2.912E-03 |
| 172.0 | 5.794E-02 | -1.193E-02 |

Conclusão: A regressão linear dos pontos de variação indica uma tendência regressiva na mudança do raio do sentido do mancal B para o A de 0.13% ou $\approx 18 \mu\text{m}$.

3. Variação longitudinal com quadrupolo de magneto permanente e variação transversal da bobina sob o eixo X

SBG-3:

Tabela 5: Valores de raio equivalente para SBG-3.

| Longitudinal Position [mm] | Nominal Horizontal Shift [mm] | Encoder Reading A [mm] | Encoder Reading B [mm] | Average Horizontal shift [mm] | Calculated Radius [mm] |
|----------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|
| -180.0000 | 3.0000 | 3.0009 | 3.0006 | 3.0008 | 12.9576 |
| | 5.0000 | 5.0003 | 5.0003 | 5.0003 | 12.9532 |
| | 7.0000 | 7.0008 | 7.0007 | 7.0008 | 12.9497 |
| | 10.0000 | 10.0002 | 10.0004 | 10.0003 | 12.9504 |
| -90.0000 | 3.0000 | 3.0004 | 3.0005 | 3.0005 | 12.9604 |
| | 5.0000 | 5.0008 | 5.0014 | 5.0011 | 12.9606 |
| | 7.0000 | 7.0012 | 7.0018 | 7.0015 | 12.9568 |
| | 10.0000 | 10.0011 | 10.0015 | 10.0013 | 12.9610 |
| 0.0000 | 3.0000 | 3.0014 | 3.0015 | 3.0015 | 12.9729 |
| | 5.0000 | 5.0007 | 5.0002 | 5.0005 | 12.9715 |
| | 7.0000 | 7.0003 | 7.0015 | 7.0009 | 12.9676 |
| | 10.0000 | 10.0009 | 10.001 | 10.0010 | 12.9676 |
| 86.0000 | 3.0000 | 2.9998 | 2.9997 | 2.9998 | 12.9779 |
| | 5.0000 | 5.001 | 5.0014 | 5.0012 | 12.9733 |
| | 7.0000 | 7.0005 | 6.9998 | 7.0002 | 12.9722 |
| | 10.0000 | 10.0004 | 10.0002 | 10.0003 | 12.9718 |
| 172.0000 | 3.0000 | 3.0007 | 3.0001 | 3.0004 | 12.9768 |
| | 5.0000 | 5.0004 | 5.0019 | 5.0012 | 12.9789 |
| | 7.0000 | 6.9999 | 7.0000 | 7.0000 | 12.9769 |
| | 10.0000 | 10.0002 | 10.0005 | 10.0004 | 12.9754 |

Tabela 6: Raio médio por deslocamento.

| Shift [mm] | R mean [mm] | std [mm] |
|------------|-------------|----------|
| 10.0060 | 12.96525 | 0.00989 |
| 7.0007 | 12.96462 | 0.01119 |
| 5.0008 | 12.96752 | 0.01036 |
| 3.0006 | 12.96910 | 0.00946 |

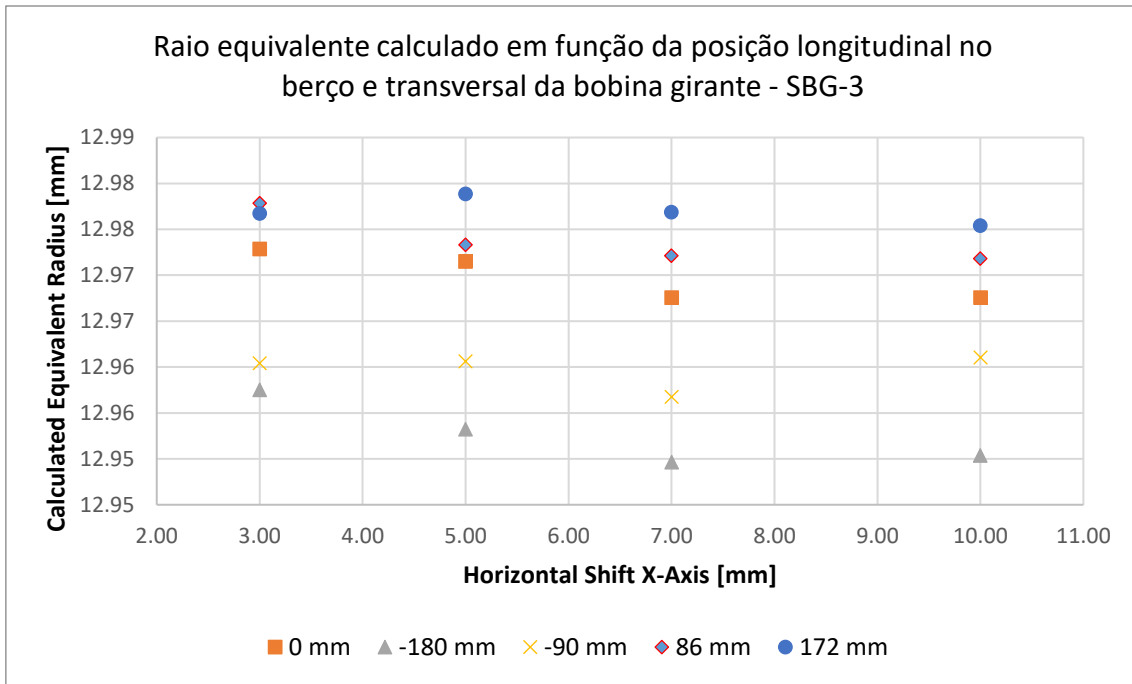


Tabela 7: Raio médio para cada posição longitudinal.

| Shift [mm] | R mean [mm] | std [mm] |
|------------|-------------|----------|
| 0.00 | 12.969892 | 0.002724 |
| -90.00 | 12.959722 | 0.001978 |
| 172.00 | 12.976979 | 0.001418 |
| -180.00 | 12.952711 | 0.003579 |
| 86.00 | 12.973795 | 0.002794 |

Conclusão: Portanto, com maior rigor no posicionamento transversal, o raio médio calculado para o SBG-3 é de **12.966 mm ± 0.001 mm** usando o quadrupolo de magneto permanente.

4. Variação longitudinal com dipolo de magneto permanente:

SBG-3

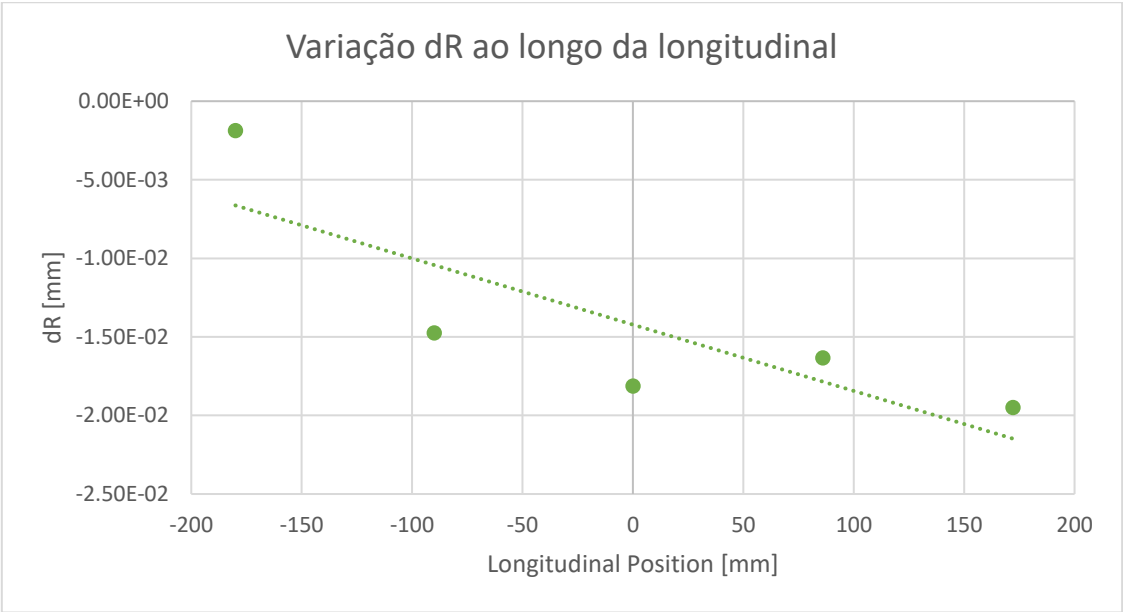


Figura 3: Variação de dR em função da posição longitudinal do dipolo sobre o berço.

Tabela 8: Dipolo Normal Integrado e variação dR para SBG-3.

| Longitudinal position [mm] | Dipolo integrado avg.L.N _n (T/m ⁿ⁻²) | dR [mm] |
|----------------------------|--|------------|
| -180.0 | 5.79066E-02 | -1.874E-03 |
| -90.0 | 5.79279E-02 | -1.475E-02 |
| 0.0 | 5.79128E-02 | -1.813E-02 |
| 86.0 | 5.79208E-02 | -1.635E-02 |
| 172.0 | 5.79067E-02 | -1.950E-02 |

Conclusão: A regressão linear dos pontos de variação indica uma tendência regressiva na mudança do raio do sentido do mancal B para o A, variação entre máximo e mínimo de 0.04% ou ≈ 5.2 μm.

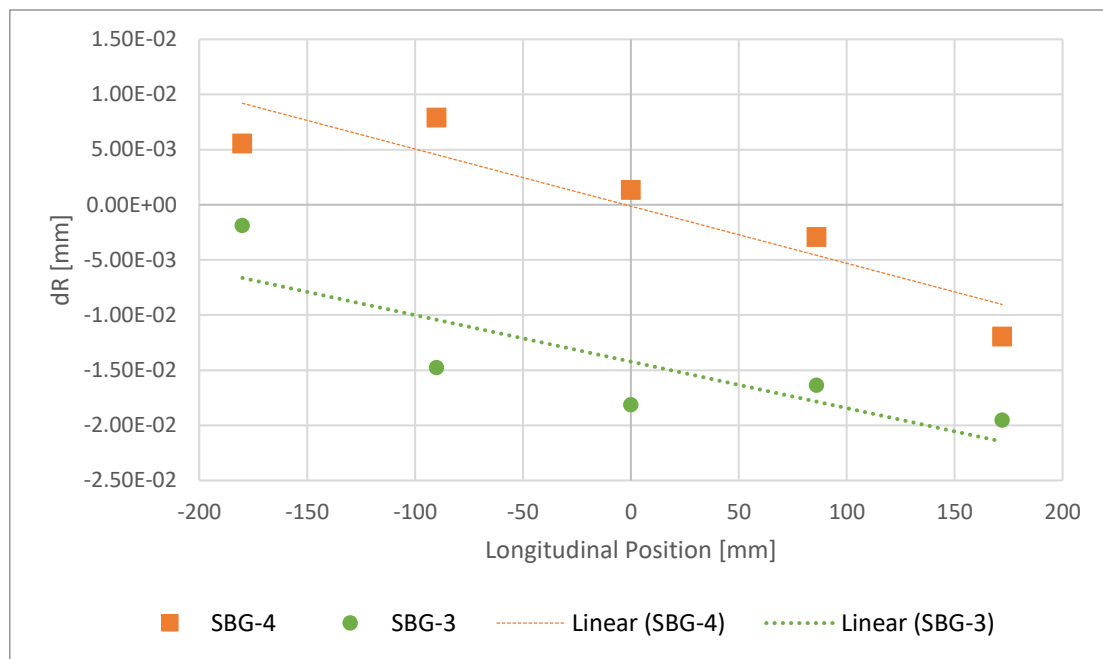


Figura 4: Comparativo da variação dR entre as duas bobinas SBG-3 E SBG-4.

5. Variação transversal da bobina na abertura do quadrupolo do Booster (@r = 17.5 mm):

SBG-4

Com o quadrupolo do Booster (BQF), executou-se apenas o processo de deslocamento transversal da bobina ao longo do eixo X com os seguintes resultados:

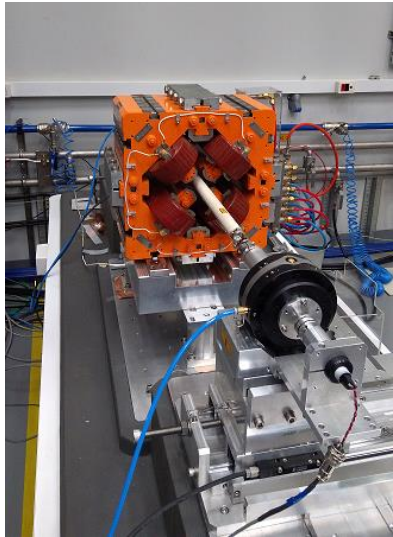


Figura 5: Quadrupolo do Booster na bancada da bobina girante.

Tabela 8: Valores para as posições de deslocamento da bobina e o valor médio.

| Linear Stages | Transversal Positions [mm] | | | |
|---------------|----------------------------|--------|--------|---------|
| | 3.0000 | 5.0000 | 7.0000 | 10.0000 |
| A | 3.0003 | 5.0025 | 7.0004 | 10.0016 |
| B | 2.9993 | 4.9974 | 6.9998 | 9.9983 |
| Média | 2.9998 | 5.0000 | 7.0001 | 10.0000 |

Tabela 9: Valor de raio médio da bobina para cada posição horizontal.

| Longitudinal position [mm] | Horizontal shift [mm] | | | |
|----------------------------|-----------------------|----------|----------|----------|
| | 5.0008 | 7.0007 | 3.0006 | 10.0006 |
| 0 | 12.94994 | 12.94649 | 12.95003 | 12.94839 |

Conclusão: O raio médio calculado para o SBG-4 utilizando o quadrupolo do Booster para o procedimento é de **12.948 mm ± 0.001 mm**.

6. Variação transversal da bobina na abertura do quadrupolo do Booster (@r = 17.5 mm):

SBG-3

Com o quadrupolo do Booster (BQF), executou-se apenas o processo de deslocamento transversal da bobina ao longo do eixo X com os seguintes resultados:

Tabela 10: Valores para as posições de deslocamento da bobina e o valor médio.

| Linear Stages | Transversal Positions [mm] | | | |
|------------------|----------------------------|--------|--------|---------|
| | 3.0000 | 5.0000 | 7.0000 | 10.0000 |
| A | 3.0007 | 5.0002 | 7.0008 | 10.001 |
| B | 2.9996 | 5.0008 | 7.0008 | 10.0015 |
| Média | 3.0002 | 5.0005 | 7.0008 | 10.0014 |

Tabela 11: Valor de raio médio para cada posição horizontal da bobina.

| Longitudinal position [mm] | Horizontal shift [mm] | | | |
|----------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| | 5.0008 | 7.0007 | 3.0006 | 10.006 |
| 0 | 12.94761 | 12.945707 | 12.944763 | 12.942598 |

Conclusão: O raio médio calculado para o SBG-3 utilizando o quadrupolo do Booster para o procedimento é de **12.945mm ± 0.001 mm**.

Comparativo dos Residuais Normal e Skew para o BQF-002 @100A entre SBG-3 e SBG-4

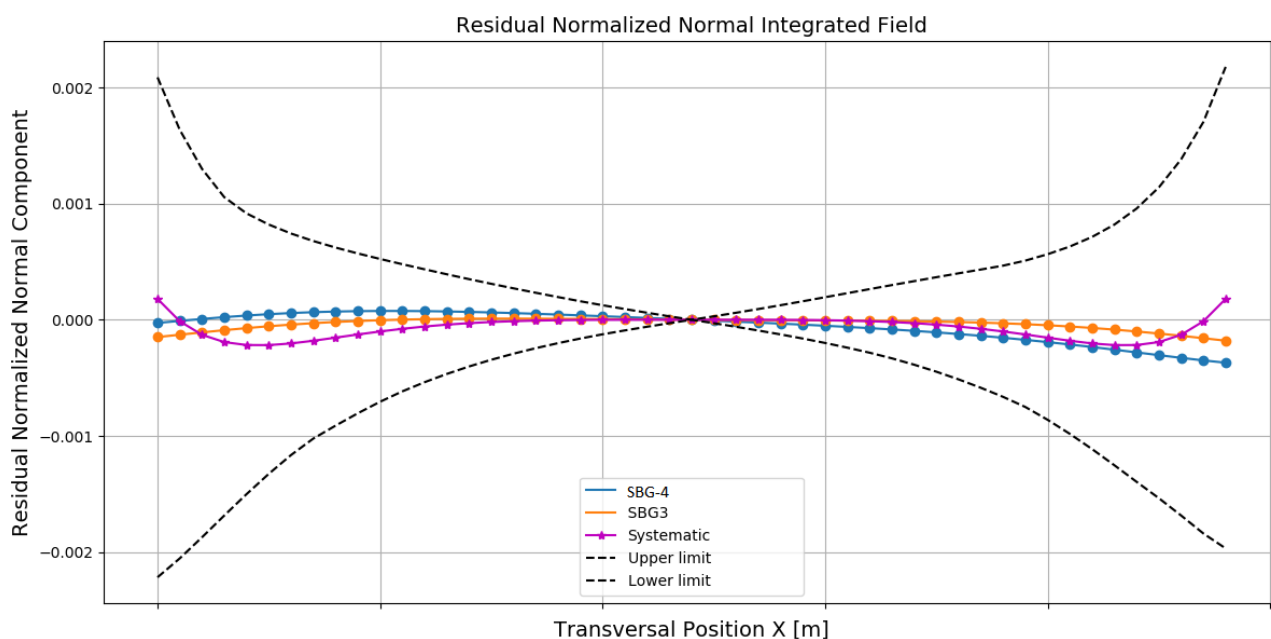


Figura 6: Comparativo do Residual Normal Normalizado entre SBG-3 e SBG-4

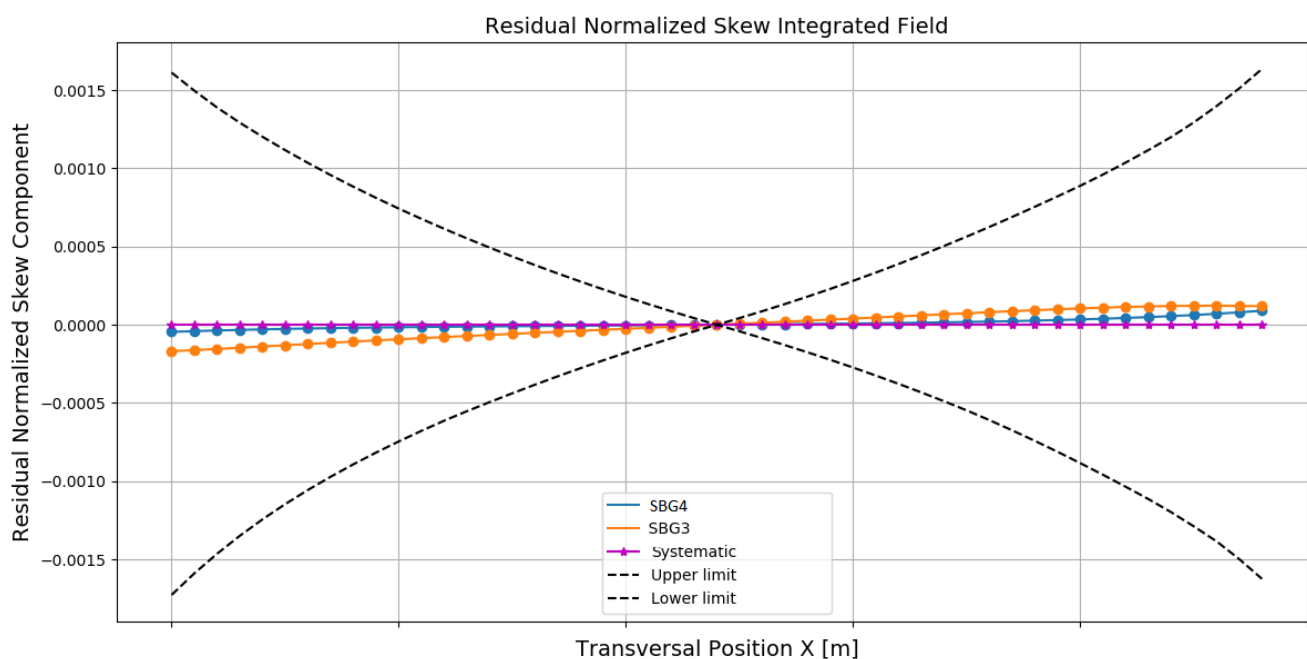


Figura 7: Comparativo do Residual Skew Normalizado entre SBG-3 e SBG-4.

Conclusão:

A partir da análise do comportamento do fluxo resultante dos componentes de quadrupolo e dipolo (ψ_2 e ψ_1 , respectivamente), nota-se a dependência do deslocamento como fator que governa a incerteza na precisão do raio equivalente da bobina. O uso de quadrupolo com harmônicos conhecidos também se mostrou importante para os testes. Por esse motivo, optou-se por fazer o mesmo procedimento alterando quadrupolo de magneto permanente por um quadrupolo eletromagnético cujo raio de abertura fosse suficiente para o processo de deslocamento de centro da bobina (método 1). Um quadro resumo dos valores calculados é apresentado abaixo:

Tabela 5: Raios equivalentes calculados para as bobinas nos quadrupolos medidos.

| | Raio Equivalente Calculado | | | |
|-------|-------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
| | Quadrupolo Magneto Permanente | | Quadrupolo Eletromagnético Booster | |
| | R [mm] | $\pm\sigma$ [mm] | R [mm] | $\pm\sigma$ [mm] |
| SBG-3 | 12.966 | 0.001 | 12.945 | 0.001 |
| SBG-4 | 12.967 | 0.006 | 12.948 | 0.001 |

A diferença de raio médio com relação aos quadrupolos testados ficou na ordem de 20 μm .

Tabela 6: Diferença de raio da bobina entre os quadrupolos testados.

| | ΔR [mm] |
|-------|-----------------|
| SBG-3 | 0.021 |
| SBG-4 | 0.019 |

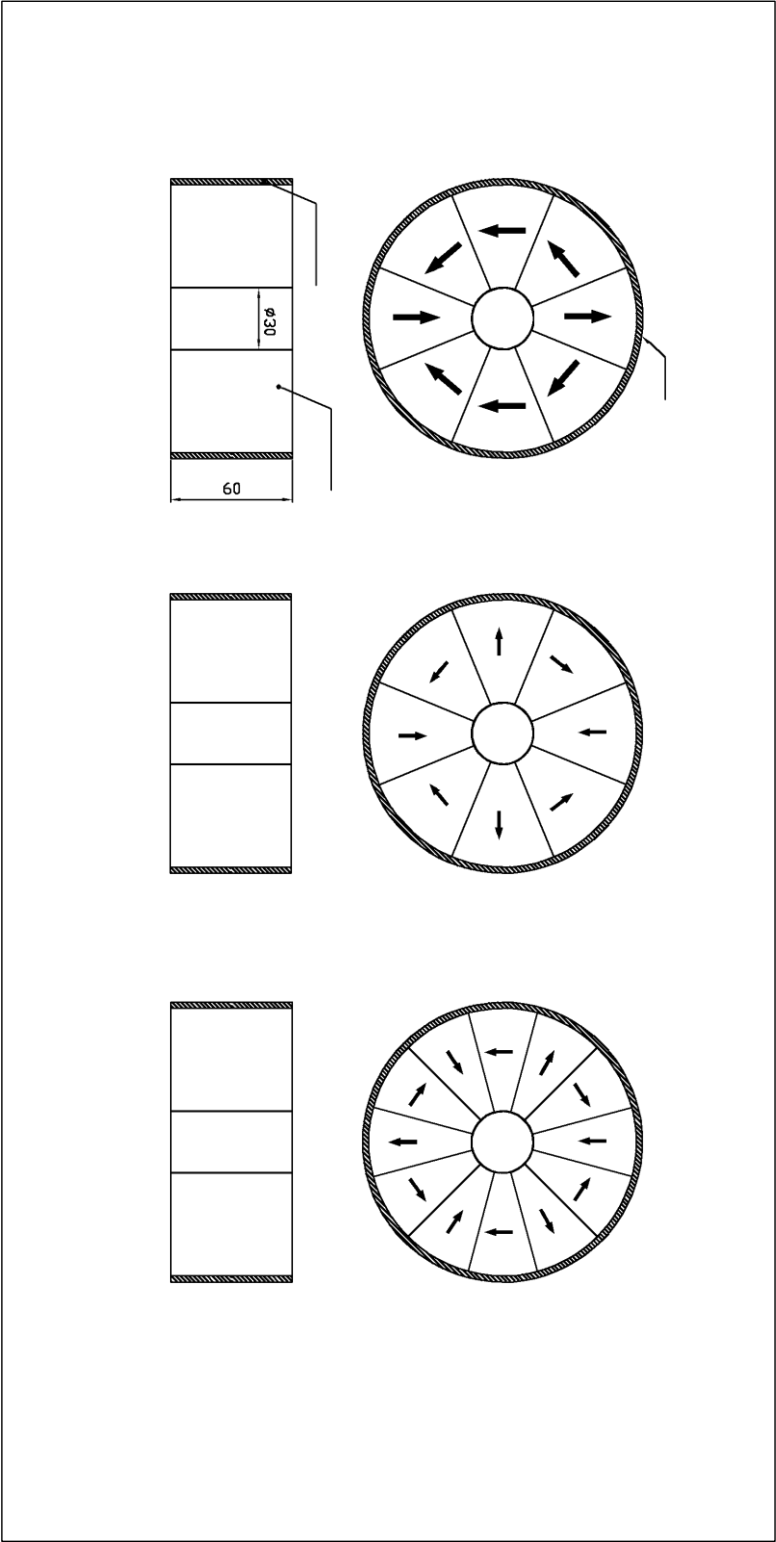
Portanto, os raios equivalentes médios para as bobinas SBG-3 e SBG-4 estão mostrados na tabela abaixo:

Tabela 7: Valores médios para o raio equivalente.

| | Média Raio Equivalente | |
|-------|------------------------|------------------|
| | R [mm] | $\pm\sigma$ [mm] |
| SBG-3 | 12.9555 | 0.0010 |
| SBG-4 | 12.9575 | 0.0040 |

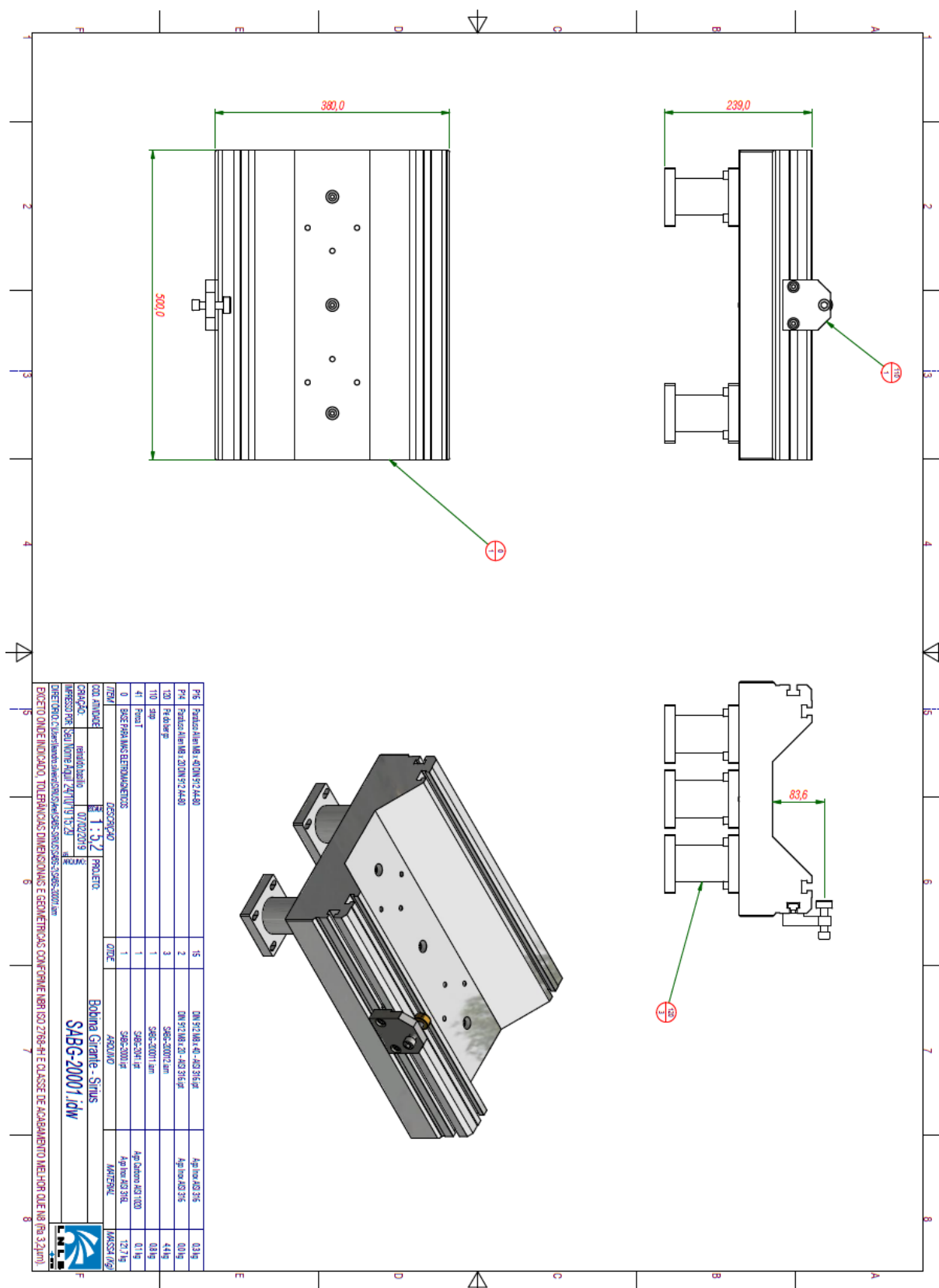
Anexo I

Projeto dipolo e quadropolo de magneto permanente usado para método 1.

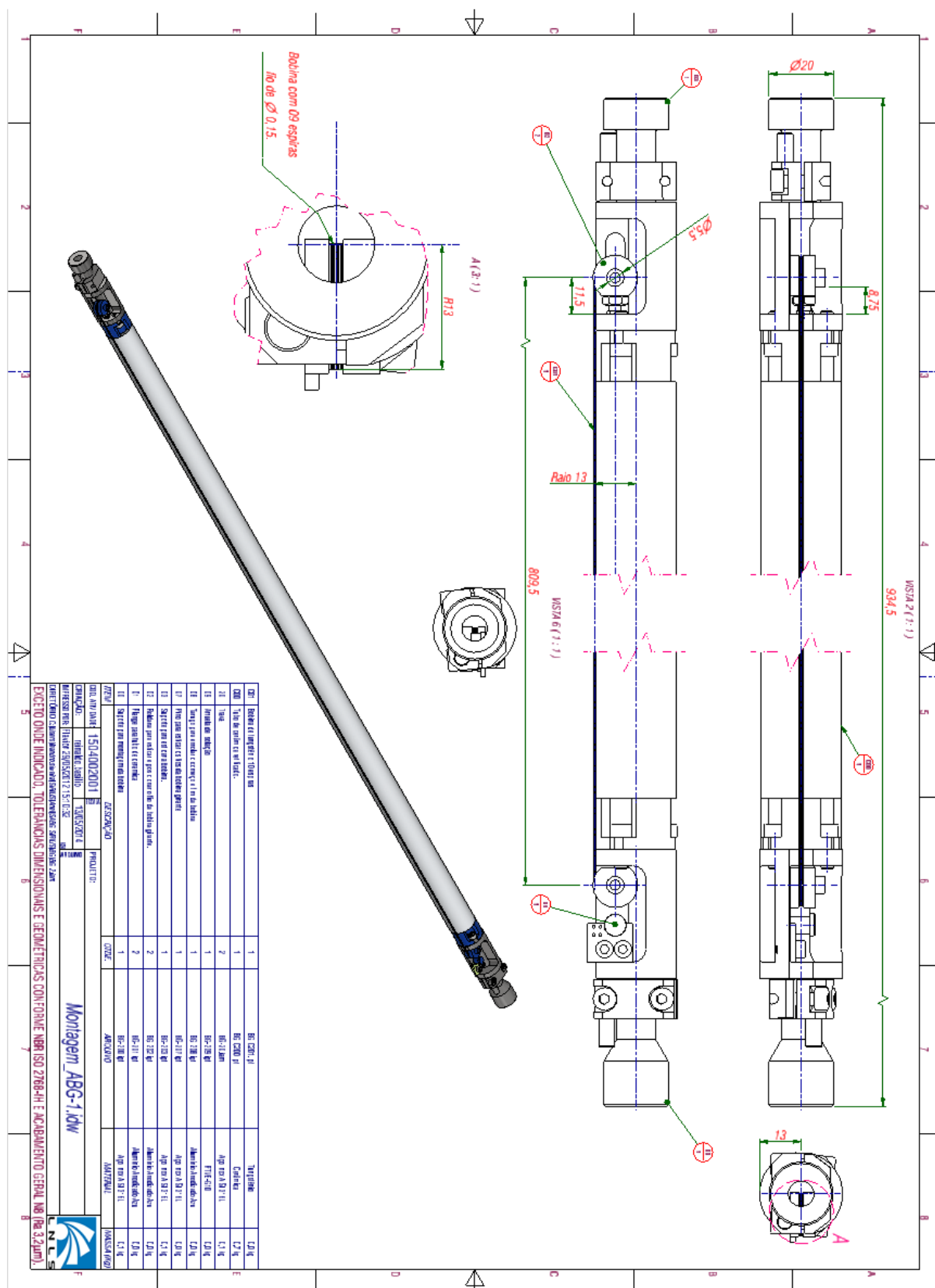


Anexo II

Desenho do berço do anel Sirius para bancada bobina girante com cotas de largura e comprimento.



Desenho da bobina girante com cotas de comprimento e raio nominal.



Referências

ARPAIA, P.; BUZIO, M.; GOLLUCCIO, G.; WALCKIERS, L. *In-situ* calibration of rotating sensor coils for magnet testing. ***Review of Scientific Instruments* 83**, 013306 (2012); doi: 10.1063/1.3675578