



CNPEM



Novembro de 2020

Relatório das curvas de excitação magnética dos Quadrupolos do Anel

Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, Campinas,
Brasil

Grupo IMAS

Neste relatório serão apresentados os resultados dos testes realizados para as curvas de excitação dos quadrupolos do anel de Armazenamento do Sirius diante do processo de comissionamento da máquina.

Sumário

| | |
|---------------------------------|----|
| 1. Introdução | 3 |
| 2. Equipamentos utilizados..... | 3 |
| 3. Metodologia | 4 |
| 4. Resultados | 11 |

1. Introdução

Com o início do processo de comissionamento do anel de armazenamento do Sirius, sentiu-se a necessidade de aprofundar o estudo do comportamento da rede magnética a fim de encontrar a melhor performance do sistema e conhecer os seus limites em condições de operação da máquina.

Inicialmente durante o processo de caracterização dos ímãs da produção WEG, para os multipolos magnéticos do anel (corretoras, quadrupolos e sextupolos), foi empregado a técnica da bobina girante que permite resolução das altas componentes harmônicas do campo integrado além de medidas com ganho de repetibilidade angular bastante convenientes (10^{-4} rad), bem como o uso de integradores digitais rápidos com conversores analógicos-digitais de 18-bits e amostragens na ordem de microssegundos, possibilitando o aumento da largura de banda e a precisão da tensão integrada no tempo.

Portanto, o intuito desse relatório é trazer a luz novas curvas de excitação para os quadrupolos do Anel uma vez que melhorias e calibrações foram adicionadas ao sistema de medida.

2. Equipamentos utilizados

Para a execução dos testes foram utilizados os equipamentos, sistemas e subsistemas disponibilizados no laboratório de medidas magnéticas juntamente a bancada de medida da bobina girante. A saber:

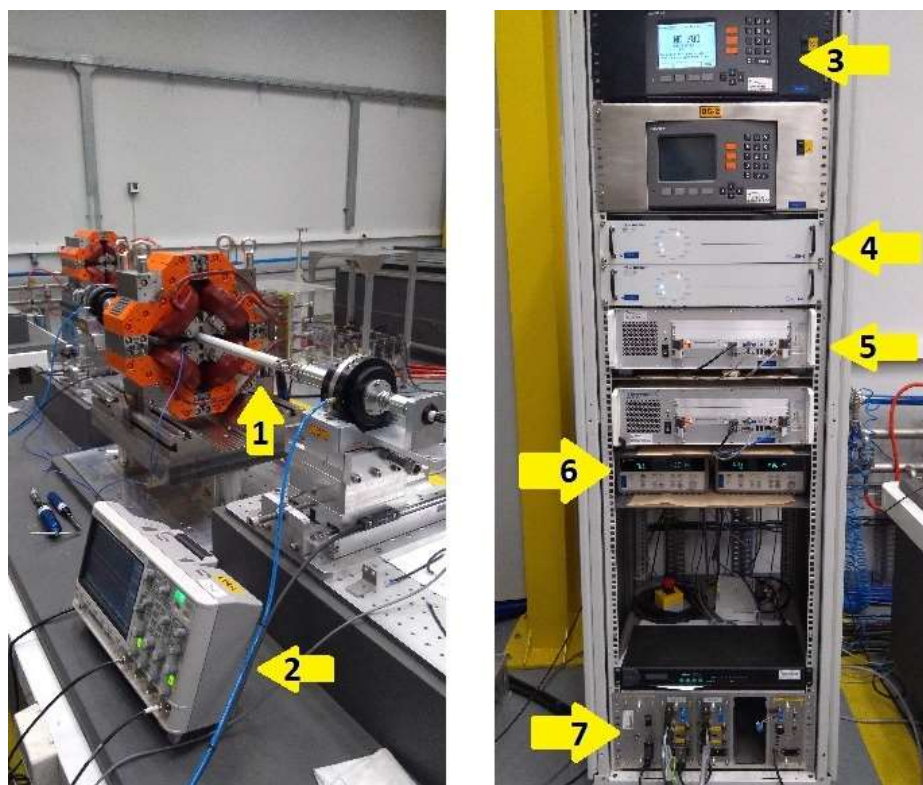


Figura 1: Equipamentos que compõe sistema de medida da bobina girante.

| Item | Descrição | Fabricante |
|------|---|------------|
| 1 | Sirius Bobina Girante SBG-4 | LNLS/IMAS |
| 1' | Angle Encoder RON 275 | Heidenhain |
| 2 | Digital Storage Oscilloscope DSO-X 3014A 100 MHz | Keysight |
| 3 | Display ND780 - v2.0.5 | Heidenhain |
| 4 | DCCT ITZ Ultrastab 600A | LEM |
| 5 | FDI2056 Fast Digital Integrator | Metrolab |
| 6 | 34970A Data Acquisition / Switch Unit | Keysight |
| 7 | Driver Microstepping/Controller OEM750X-M2 | Parker |
| 8 | Fonte de corrente FAC-2P DC/DC 1000A, versão udc: V0.38i2020-03-04 | LNLS/ELP |

3. Metodologia

Foram criadas 6 (seis) etapas para realização dos testes e curvas de excitação dos quadrupolos. A ideia central foi analisar o máximo de atributos emulando as condições de operação da máquina. A descrição das etapas está listada abaixo:

ETAPA 1 - Testar a curva de desmagnetização da bobina principal

Nesta etapa procurou-se estabelecer uma rotina de teste que consistia em analisar o resultado da curva de desmagnetização aplicada ao ímã a fim de limpar seu 'histórico magnético' para que não houvesse perturbação ou efeitos de campos remanentes advindos de magnetizações precedentes. O processo consiste em aplicar um sinal do tipo senoidal amortecido nas bobinas do eletromagneto com frequência, amplitude, fase e tempo de decaimento bem definidos como mostrado na Tabela 1. Após aplicação da curva sobre as bobinas, zera-se a corrente e a medida é realizada. O objetivo é verificar o valor do campo remanente e se este atende às especificações de referência para garantir a desmagnetização.

Tabela 1: Valores da curva de desmagnetização da bobina principal dos quadrupolos.

| Parâmetros | Desmagnetização Bobina Principal |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Tipo | Senoidal amortecida |
| Número de ciclos | 15 |
| Frequência [Hz] | 0.1 |
| Amplitude [A] | Máx. (Nominal) |
| Offset [A] | 0 |
| Defasagem inicial [°] | 0 |
| Defasagem final [°] | 0 |
| Constante de amortecimento [s] | 30 |

Procedimento:

- Colocar a bobina principal na corrente nominal;
- Colocar a bobina trim na corrente máxima;
- Zerar correntes;
- Desmagnetizar a bobina principal (Senoidal Amortecida 160 A, 0.1 Hz, 15 ciclos, 30 s);
- Medir o campo residual;

ETAPA 2 - Testar a curva de desmagnetização da bobina trim

Para esse teste o objetivo é analisar o campo remanente de modo similar ao que foi feito anteriormente para as bobinas principais, porém dessa vez, aplicando a curva de desmagnetização apenas nas bobinas auxiliares (trim). Com isso, verificamos qual o comportamento do campo residual diante da desmagnetização somente da bobina trim. Os parâmetros da curva de desmagnetização estão listados na Tabela 2:

Tabela 2: Valores da curva de desmagnetização da bobina trim dos quadrupolos.

| Parâmetros | Desmagnetização Bobina Trim |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Tipo | Senoidal amortecida |
| Número de ciclos | 7 |
| Frequência [Hz] | 0.1 |
| Amplitude [A] | Máx. (Nominal) |
| Offset [A] | 0 |
| Defasagem inicial [°] | 0 |
| Defasagem final [°] | 0 |
| Constante de amortecimento [s] | 10 |

Procedimento:

- Colocar a bobina principal na corrente nominal;
- Colocar a bobina trim na corrente máxima;
- Zerar correntes;
- Desmagnetizar a bobina trim (Senoidal Amortecida 10 A, 0.1 Hz, 7 ciclos, 10 s);
- Medir o campo residual;

ETAPA 3 - Testar o regime de operação

A etapa 3 concentra-se em analisar o regime de operação do eletromagneto, ou seja, após efetuar uma curva de desmagnetização, aplica-se uma corrente nominal nas bobinas principais realizando uma medida de campo integrado. Logo após, zeramos a corrente no ímã e imediatamente é reaplicada a corrente nominal, fazendo uma nova medida. Com isso, estima-se em qual período o ímã entra em regime de operação, verificando a diferença entre as medidas de campo integrado em corrente nominal. Essa diferença deve ser desprezível indicando que o ímã entrou no seu regime de operação. É válido destacar que a taxa de variação de corrente da fonte (*slew rate*) de zero à corrente nominal foi definida em 50 A/s.

Procedimento:

- Desmagnetizar bobina principal (Senoidal Amortecida 160 A, 0.1 Hz, 15 ciclos, 30 s);
- Colocar a bobina principal na corrente máxima;
- **#1 Medir o campo integrado;**
- Zerar corrente;
- Colocar a bobina principal na corrente máxima;
- **#2 Medir o campo integrado;**
- Zerar corrente;
- Colocar a bobina principal na corrente máxima;
- **#3 Medir o campo integrado;**
- Zerar corrente;

ETAPA 3.1 - Testar desmagnetização bobina trim + ciclagem bobina principal

A etapa 3.1 reflete a ideia de continuar os testes anteriores de desmagnetização, porém acrescentando uma curva de ciclagem na bobina principal. A curva de ciclagem favorece o processo de regime de operação do magneto uma vez que fora executada uma curva de desmagnetização nas bobinas auxiliares (trim).

A curva de ciclagem é do tipo senoidal monopolar com amplitude nominal e offset deslocado para manter uma única polaridade da senóide. As fases inicial e final também são deslocadas para que o ponto de início e ponto final coincidam em zero em 270°, como mostra o exemplo na Figura 2. A Tabela 3 contém os parâmetros para a ciclagem monopolar senoidal.

A execução se dá da seguinte forma: Primeiro zeramos a corrente para ambas as bobinas (principal e trim), em seguida procedemos a ciclagem de desmagnetização da bobina trim (Senoidal Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s), logo após aplica-se a curva de ciclagem sobre a bobina principal (Senoidal, Amp.: 75 A, Offset: 75A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°), por fim, é feita a medida do campo integrado na corrente nominal. Todo o processo é executado ao mínimo três vezes.

Tabela 3: Valores da curva de ciclagem da bobina principal dos quadrupolos.

| Parâmetros | Ciclagem bobina principal |
|-----------------------|---------------------------|
| Tipo | Senoidal |
| Número de ciclos | 3 |
| Frequência [Hz] | 0.1 |
| Amplitude [A] | Máx./2 |
| Offset [A] | Máx./2 |
| Defasagem inicial [°] | 270 |
| Defasagem final [°] | 270 |

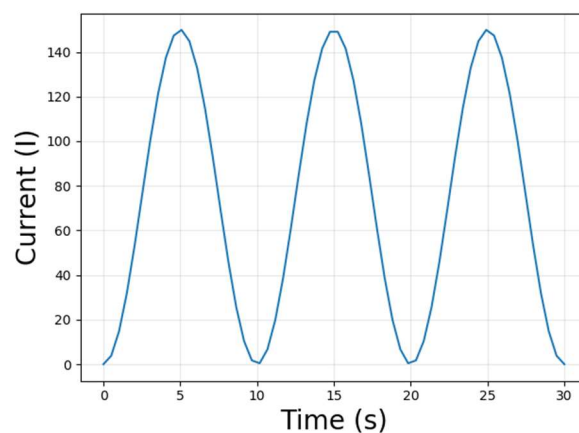


Figura 2: Exemplo de ciclagem monopolar senoidal para a bobina principal.

Procedimento:

- Zerar corrente;
- Desmagnetizar TRIM (Senoidal Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s);
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp.: 75 A, Offset: 75A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°);
- **Medida 1 @150A;**
- Zerar corrente;
- Desmagnetizar TRIM (Senoidal Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s);
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp.: 75 A, Offset: 75A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°);
- **Medida 2 @150A;**
- Zerar corrente;
- Desmagnetizar TRIM (Senoidal Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s);
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp.: 75 A, Offset: 75A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°);
- **Medida 3 @150A;**
- Zerar corrente;

A análise do resultado se dá mediante a comparação dos valores dos quadrupolos integrados em cada uma das medidas.

ETAPA 4 – Curvas de excitação da bobina principal

Durante a etapa 4 é realizada dois tipos de ciclagem antes de ser executada a rampa de excitação magnética do quadrupolo. A primeira curva executada é a ciclagem de desmagnetização bipolar senoidal amortecida, aplicada à bobina principal, com o objetivo de apagar o histórico magnético precedente do ímã. Logo após, executa-se mais uma curva de desmagnetização, dessa vez, aplicada à bobina auxiliar (trim) e com os mesmos parâmetros anteriores. Posteriormente, é procedida a ciclagem monopolar senoidal na bobina principal. Após a execução dessas duas curvas, é realizada a rampa de excitação magnética até a corrente nominal para cada quadrupolo. Todo o processo é executado ao mínimo três vezes para que sejam comparadas as rampas de excitação em cada um deles. A Tabela 4 apresenta os valores para ciclagem de desmagnetização da bobina auxiliar (trim) e a ciclagem da bobina principal.

Tabela 4: Parâmetros de ciclagem.

| Parâmetros | Desmagnetização Trim | Ciclagem |
|--------------------------------|----------------------|----------|
| Tipo | Senoidal amortecida | Senoidal |
| Número de ciclos | 7 | 3 |
| Frequência [Hz] | 0.1 | 0.1 |
| Amplitude [A] | 10 | 80 |
| Offset [A] | 0 | 80 |
| Defasagem inicial [°] | 0 | 270 |
| Defasagem final [°] | 0 | 270 |
| Constante de amortecimento [s] | 10 | - |

Procedimento:

- Desmagnetizar MAIN (Senóide Amortecida 160A, 0.1Hz, 15 ciclos, 30 s)
- Desmagnetizar TRIM (Senóide Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s)
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp.: 80 A, Offset: 80A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°)
- **1 Rampa de excitação @160A**
- Desmagnetizar TRIM (Senóide Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s)
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp.: 80 A, Offset: 80A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°)
- **2 Rampa de excitação @160A**
- Desmagnetizar TRIM (Senóide Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s)

- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp.: 80 A, Offset: 80A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°)
- **3 Rampa de excitação @160A**
- Desmagnetizar TRIM (Senóide Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s)
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp.: 80 A, Offset: 80A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°)

Os resultados serão analisados comparando as curvas de excitação com as já empregadas anteriormente.

ETAPA 5 - Curva de excitação da bobina auxiliar (trim) para vários valores de corrente na bobina principal

Inicia-se a etapa 5 com uma ciclagem de desmagnetização senoidal amortecida na bobina principal do mesmo modo que fora realizado nas demais etapas. A ideia aqui é realizar curvas de excitação nas bobinas trims para diferentes condições e correntes aplicadas na bobina principal. Ou seja, após as curvas de desmagnetização de ambas as bobinas, aplica-se a curva de ciclagem na bobina principal com os parâmetros da Tabela 4, e estabelece-se uma corrente fixa na bobina principal. Com isso, é executado sobre a bobina trim uma curva de excitação para verificarmos o comportamento magnético do quadrupolo sobre essas condições de operação. Os pontos fixos de corrente definidos para a bobina principal do quadrupolo são: [60, 80, 95, 110, 120, 140, 150] A. Já os pontos de corrente para a rampa de excitação da bobina trim são: [0.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 8.0, 6.0, 4.0, 2.0, 0.0, -2.0, -4.0, -6.0, -8.0, -10.0, -8.0, -6.0, -4.0, -2.0, 0.0] A.

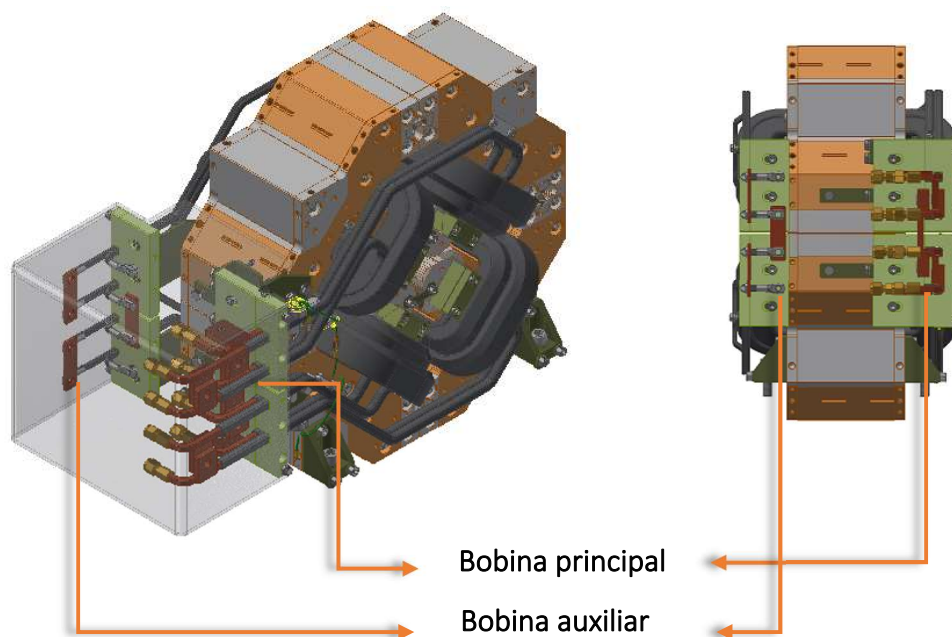


Figura 3: Desenho 3D ilustrando a disposição das bobinas auxiliares (trim) e bobinas principais no quadrupolo.

Procedimento:

- Desmagnetizar MAIN (Senóide Amortecida 160A, 0.1Hz, 15 ciclos, 30s)
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp: 80 A, Offset: 80A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°)
- MAIN @ 60A
- **1 Rampa de excitação TRIM @ Main 60A**
- Zerar corrente
- Desmagnetizar MAIN (Senóide Amortecida 160A, 0.1Hz, 15 ciclos, 30s)
- Desmagnetizar TRIM (Senóide Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s)
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp: 80 A, Offset: 80A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°)
- **2 Rampa de excitação TRIM @ Main 80A**
- Zerar corrente
- Desmagnetizar MAIN (Senóide Amortecida 160A, 0.1Hz, 15 ciclos, 30s)
- Desmagnetizar TRIM (Senóide Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s)
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp: 80 A, Offset: 80A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°)
- **3 Rampa de excitação TRIM @ Main 95A**
- Zerar corrente
- Desmagnetizar MAIN (Senóide Amortecida 160A, 0.1Hz, 15 ciclos, 30s)
- Desmagnetizar TRIM (Senóide Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s)
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp: 80 A, Offset: 80A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°)
- **4 Rampa de excitação TRIM @ Main 110A**
- Zerar corrente
- Desmagnetizar MAIN (Senóide Amortecida 160A, 0.1Hz, 15 ciclos, 30s)
- Desmagnetizar TRIM (Senóide Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s)
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp: 80 A, Offset: 80A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°)
- **5 Rampa de excitação TRIM @ Main 120A**
- Zerar corrente
- Desmagnetizar MAIN (Senóide Amortecida 160A, 0.1Hz, 15 ciclos, 30s)
- Desmagnetizar TRIM (Senóide Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s)
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp: 80 A, Offset: 80A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°)
- **6 Rampa de excitação TRIM @ Main 140A**
- Zerar corrente
- Desmagnetizar MAIN (Senóide Amortecida 160A, 0.1Hz, 15 ciclos, 30s)
- Desmagnetizar TRIM (Senóide Amortecida 10A, 0.1Hz, 7 ciclos, 10 s)
- Ciclagem MAIN (Senoidal, Amp: 80 A, Offset: 80A, 0.1Hz, 3 ciclos, ini:270°, final:270°)
- **7 Rampa de excitação TRIM @ Main 150A**
- Zerar corrente
- Desmagnetizar MAIN (Senóide Amortecida 160A, 0.1Hz, 15 ciclos, 30s)

4. Resultados

Os resultados das referidas etapas serão apresentados em sua sequência, respeitando-se a ordem em que os quadrupolos foram testados. Optou-se por analisar magnetos que foram medidos durante a jornada de medidas dos ímãs da produção WEG (2018) para que se pudesse ter estatísticas sobre as novas medidas das rampas de excitação.

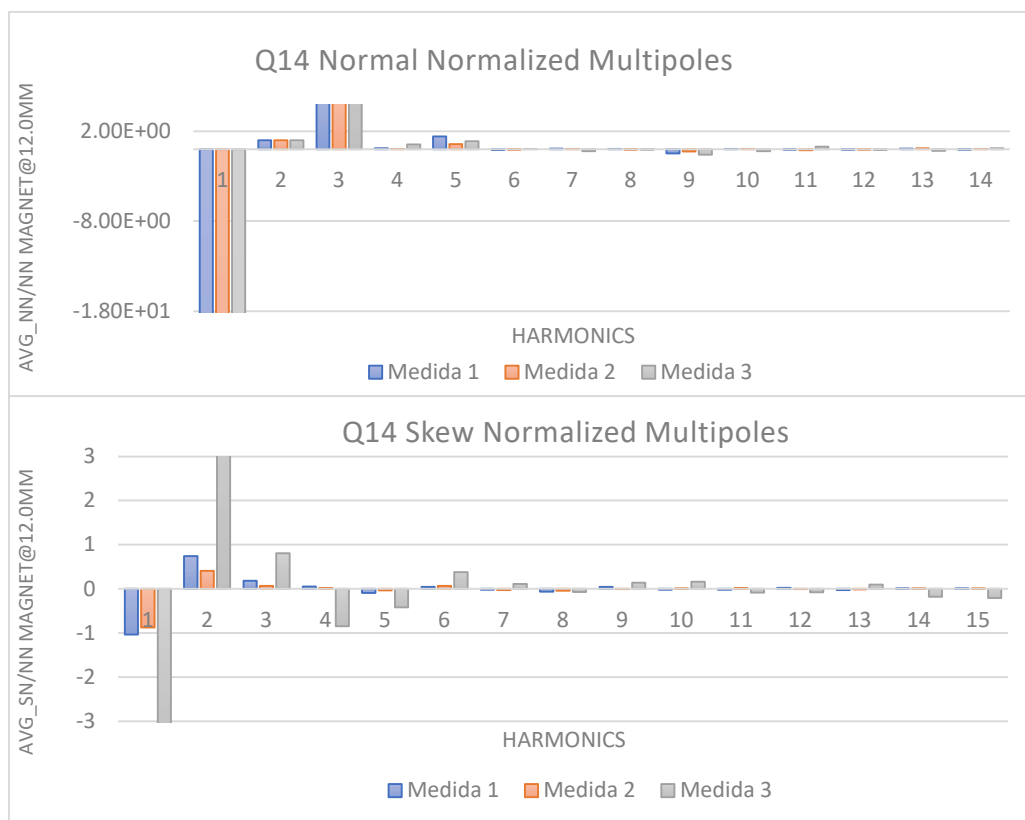
ETAPA 1 - Testar a curva de desmagnetização da bobina principal

Para análise dos resultados da etapa 1 procurou-se comparar os resultados da média dos dados brutos (Mean) e a média desses dados brutos absolutos (MeanAbs) dos pontos de integração vindos do integrador além do valor medido do quadrupolo integrado (Inte. Quad. (T)) para cada medida realizada:

- Q14-044

Tabela 5: Valores brutos médios, absolutos e residual do quadrupolo Q14-044.

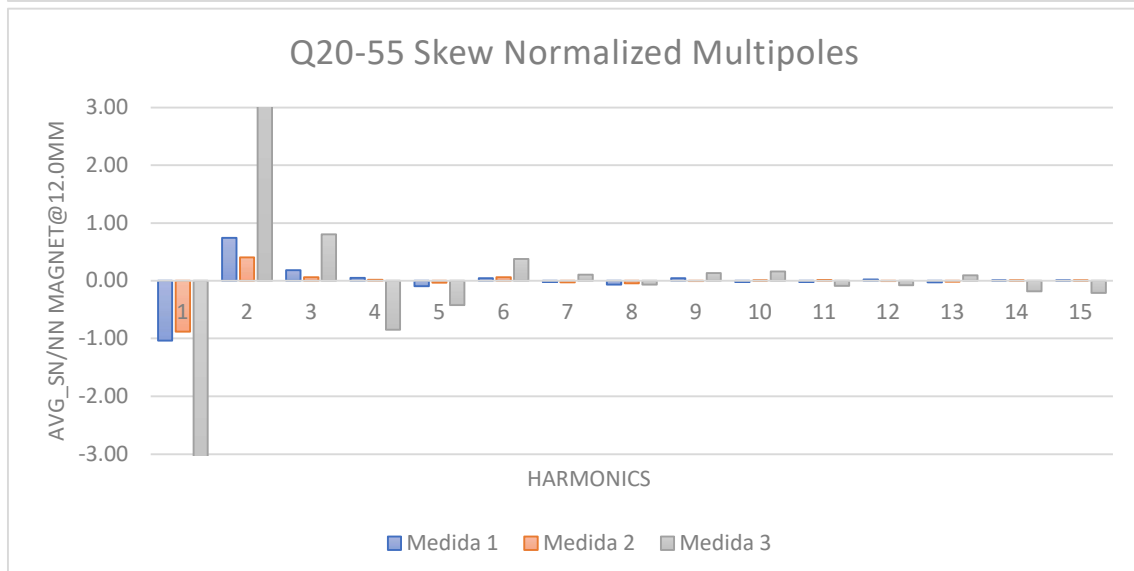
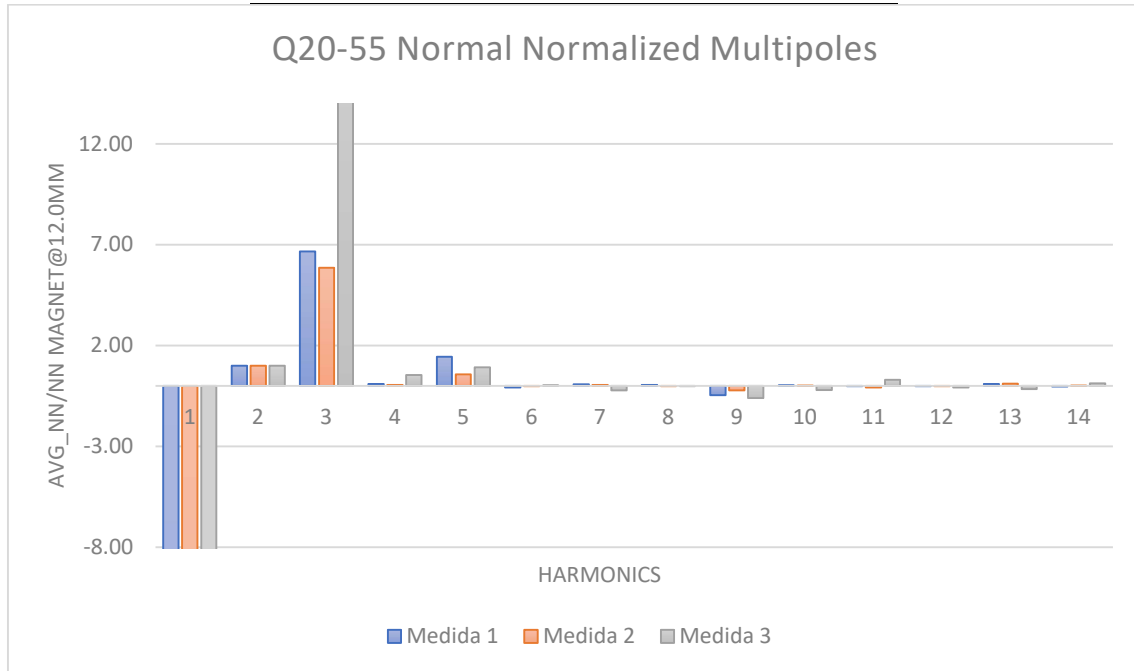
| Meas | Mean (V.s) | MeanAbs (V.s) | Inte. Quad. (T) |
|------|-----------------|------------------|-----------------|
| M1 | 3.55E-07 | 3.55E-07 | 1.29E-04 |
| M2 | 3.56E-07 | 3.56E-07 | 7.60E-05 |
| M3 | 3.59E-07 | 3.59E-07 | 7.35E-05 |
| avg | 3.57E-07 | 3.57E-07 | 9.27E-05 |
| std | 1.62E-09 | 1.62E-09 | 2.54E-05 |



- Q20-055

Tabela 6: Valores brutos médios, absolutos e residual do quadrupolo Q20-055.

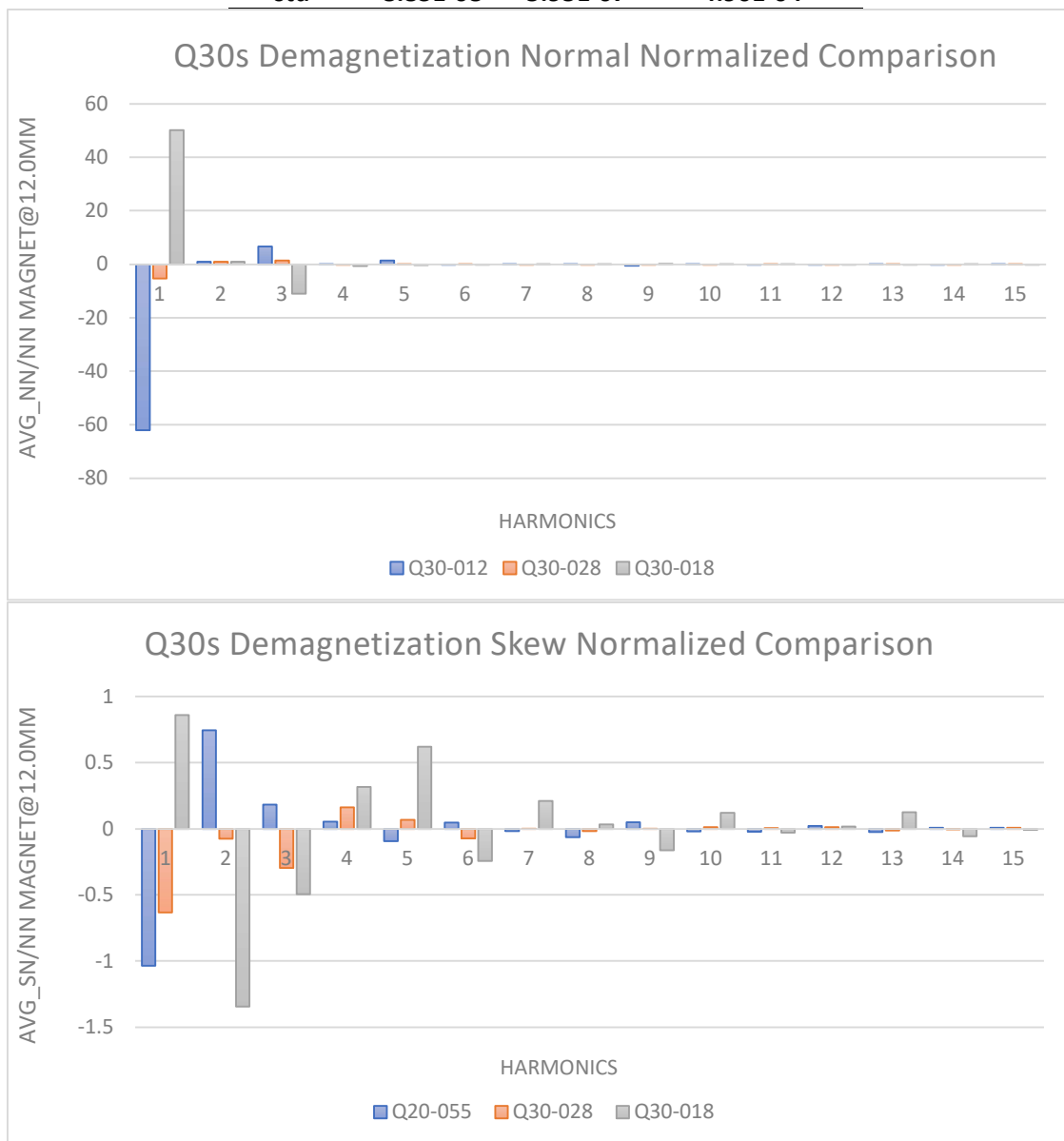
| Meas | Mean (V.s) | MeanAbs (V.s) | Inte. Quad. (T) |
|------|------------|---------------|-----------------|
| M1 | 5.02E-07 | 6.69E-07 | 2.06E-05 |
| M2 | 5.53E-07 | 7.60E-07 | 3.87E-04 |
| M3 | 5.33E-07 | 7.29E-07 | 1.14E-04 |
| avg | 5.29E-07 | 7.19E-07 | 1.74E-04 |
| std | 2.09E-08 | 3.76E-08 | 1.55E-04 |



- Q30s (012, 018, 028)

Tabela 7: Valores brutos médios, absolutos e residual dos quadropolos Q30s.

| Meas | Mean (V.s) | MeanAbs (V.s) | Inte. Quad. (T) |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Q30-012 | 5.82E-07 | 1.80E-06 | 6.63E-04 |
| Q30-018 | 3.92E-07 | 3.98E-07 | -2.57E-04 |
| Q30-028 | 3.99E-07 | 7.66E-07 | 8.70E-04 |
| avg | 4.58E-08 | 9.89E-07 | 4.26E-04 |
| std | 8.83E-08 | 5.95E-07 | 4.90E-04 |



Conclusão: Verificamos que a ordem de grandezas médias dos harmônicos principais ficou entre $1\text{E-}05$ T caracterizando um campo residual praticamente nulo após uma ciclagem bipolar senoidal amortecida.

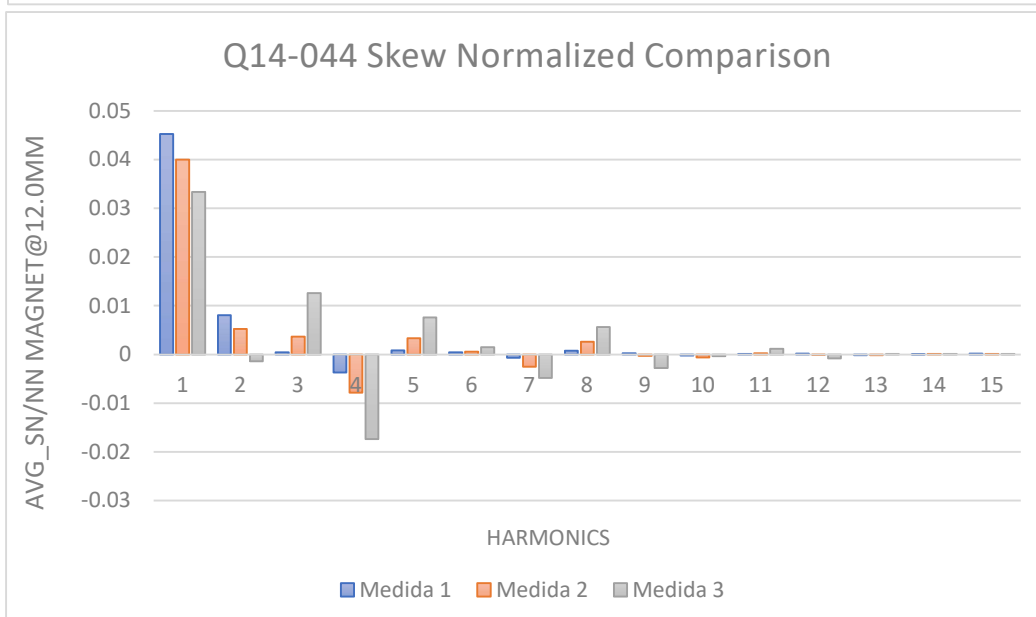
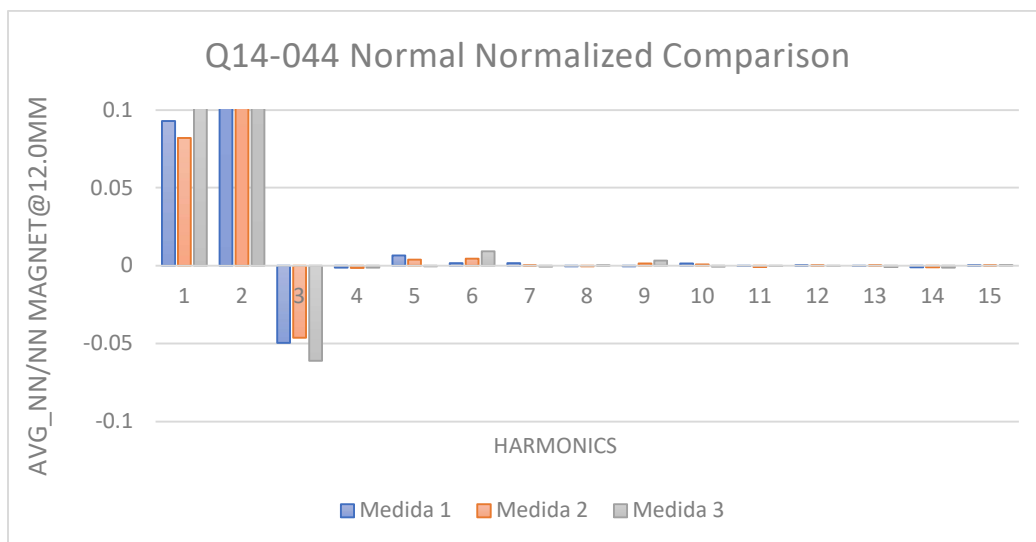
ETAPA 2 - Testar a curva de desmagnetização da bobina trim

Para analisar os resultados da desmagnetização aplicada a bobina trim, compara-se cada uma das medidas realizadas. Também se verifica a eficiência da desmagnetização da bobina trim comparada a desmagnetização da bobina principal.

- Q14-044

Tabela 8: Valores brutos médios, absolutos e residual do quadrupolo Q14-044.

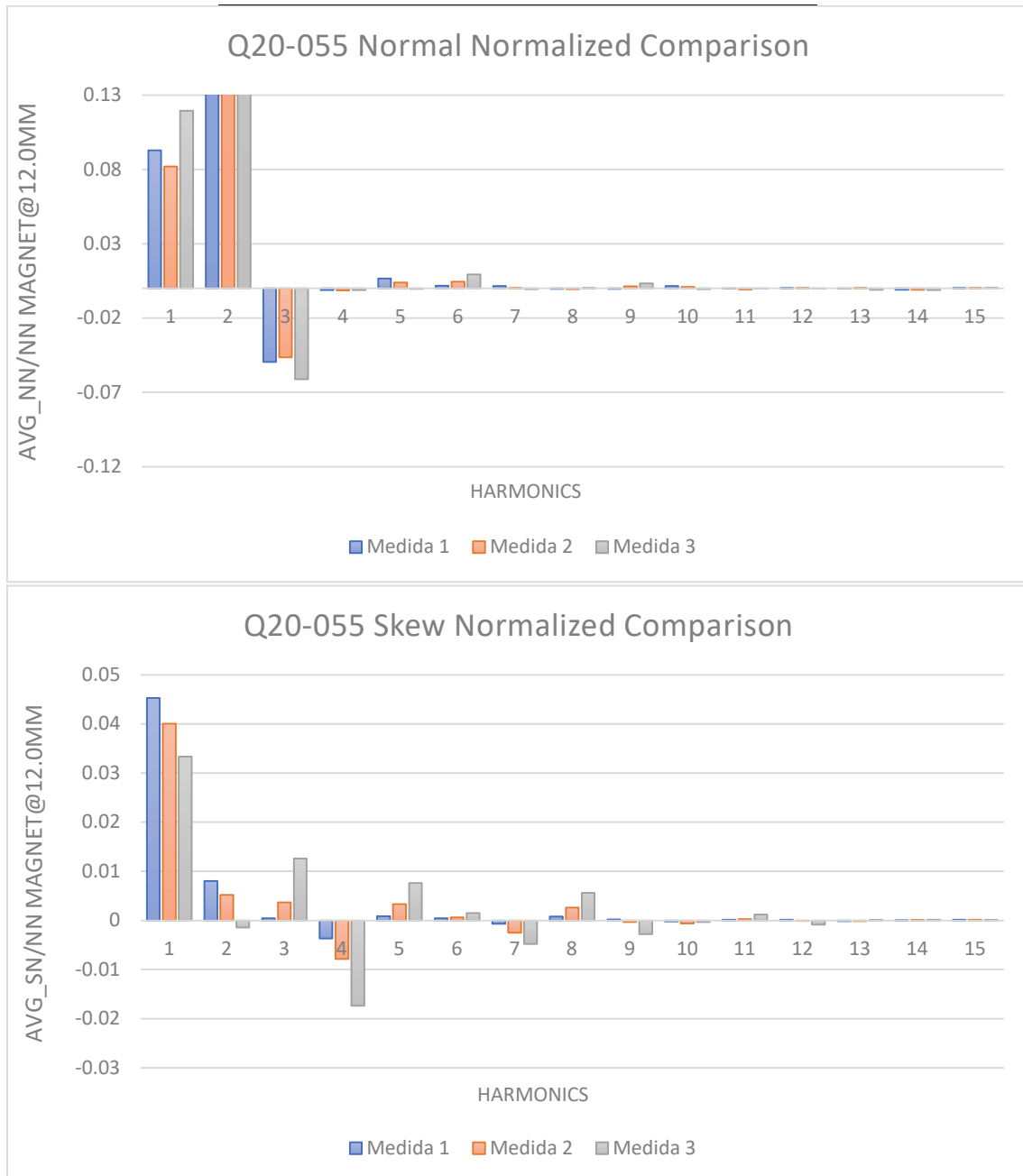
| Meas | MeanAbs | | |
|------|-----------------|-----------------|------------------|
| | Mean (V.s) | (V.s) | Inte. Quad. (T) |
| M1 | 3.85E-07 | 9.36E-07 | -1.78E-02 |
| M2 | 3.86E-07 | 9.70E-07 | -1.85E-02 |
| M3 | 3.87E-07 | 9.86E-07 | -1.88E-02 |
| avg | 3.86E-07 | 9.64E-07 | -1.84E-02 |
| std | 1.22E-09 | 2.55E-08 | 5.22E-04 |



- Q20-055

Tabela 9: Valores brutos médios, absolutos e residual do quadrupolo Q20-055.

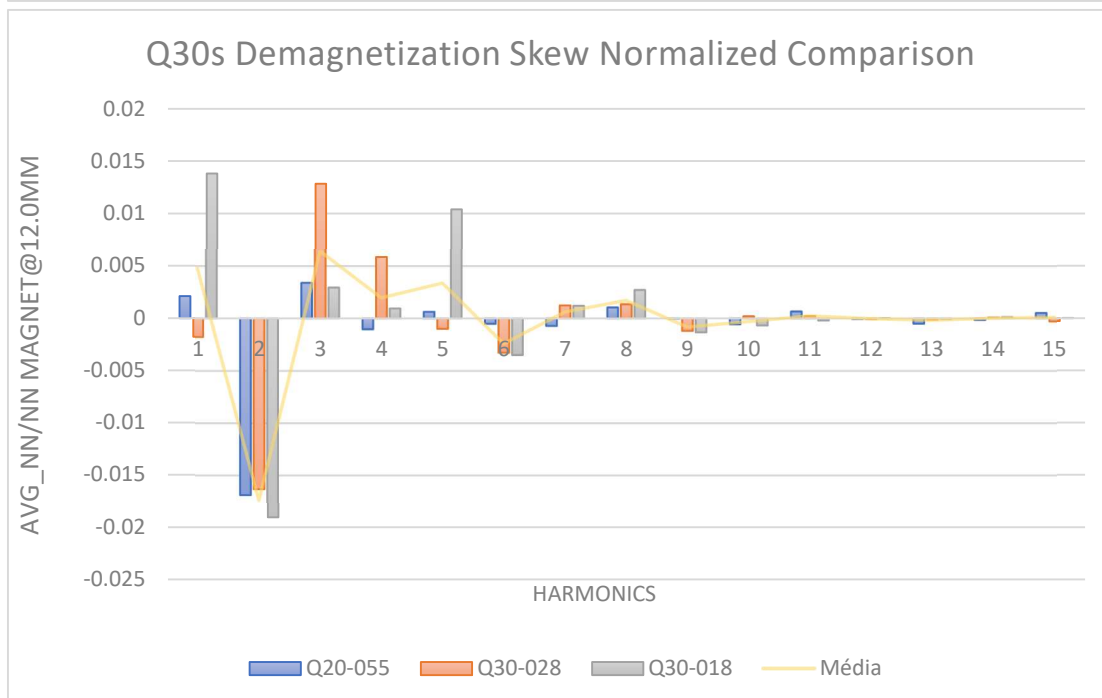
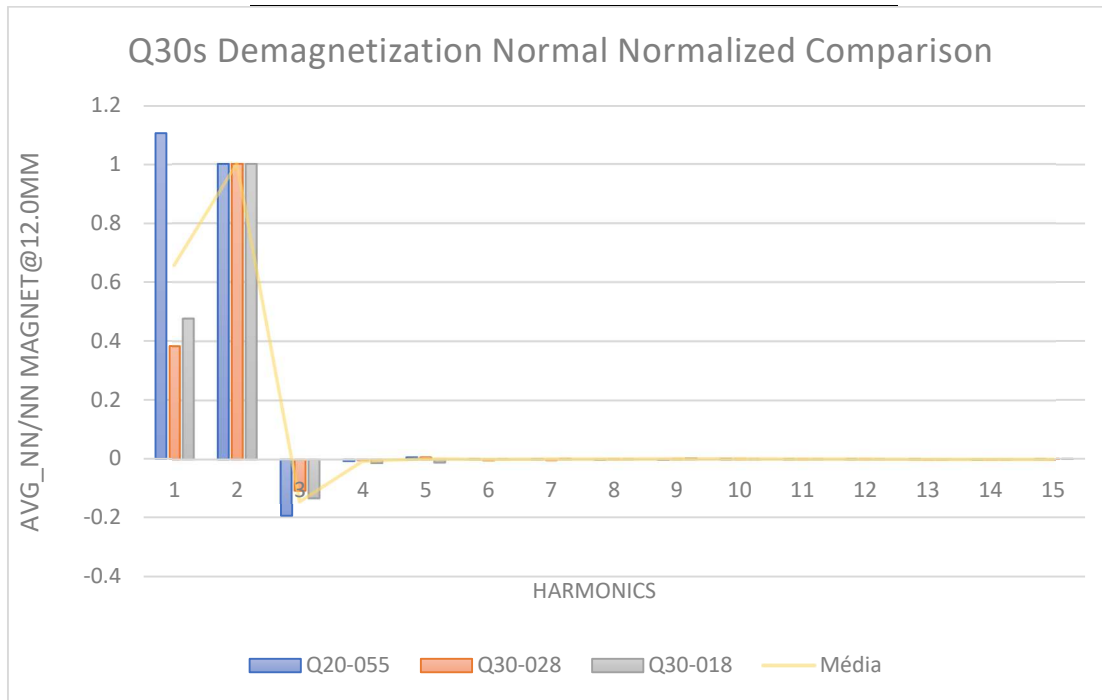
| Meas | Mean (V.s) | MeanAbs (V.s) | Inte. Quad. (T) |
|------|-----------------|-----------------|------------------|
| M1 | 3.98E-07 | 1.63E-06 | -3.16E-02 |
| M2 | 4.15E-07 | 1.67E-06 | -3.24E-02 |
| M3 | 4.73E-07 | 1.68E-06 | -3.24E-02 |
| avg | 4.29E-07 | 1.66E-06 | -3.21E-02 |
| std | 3.19E-08 | 2.23E-08 | 3.75E-04 |



- Q30s (012, 018, 028)

Tabela 10: Valores brutos médios, absolutos e residual dos quadrupolos Q30s.

| Mag. | Mean (V.s) | MeanAbs (V.s) | Inte. Quad. (T) |
|------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Q30-012 | 6.30E-07 | 2.93E-06 | -4.34E-02 |
| Q30-018 | 5.84E-07 | 2.35E-06 | -4.49E-02 |
| Q30-028 | 4.65E-07 | 2.42E-06 | -4.56E-02 |
| avg | 5.60E-07 | 2.57E-06 | -4.46E-02 |
| std | 6.94E-08 | 2.56E-07 | 9.25E-04 |



Comparação entre as desmagnetizações principal X trim

A figura abaixo apresenta a comparação entre os quadrupolos normais integrados quando desmagnetizados pela bobina principal e pela bobina trim. Observa-se a permanência de um quadrupolo residual significativo quando executada apenas a desmagnetização pela bobina trim.

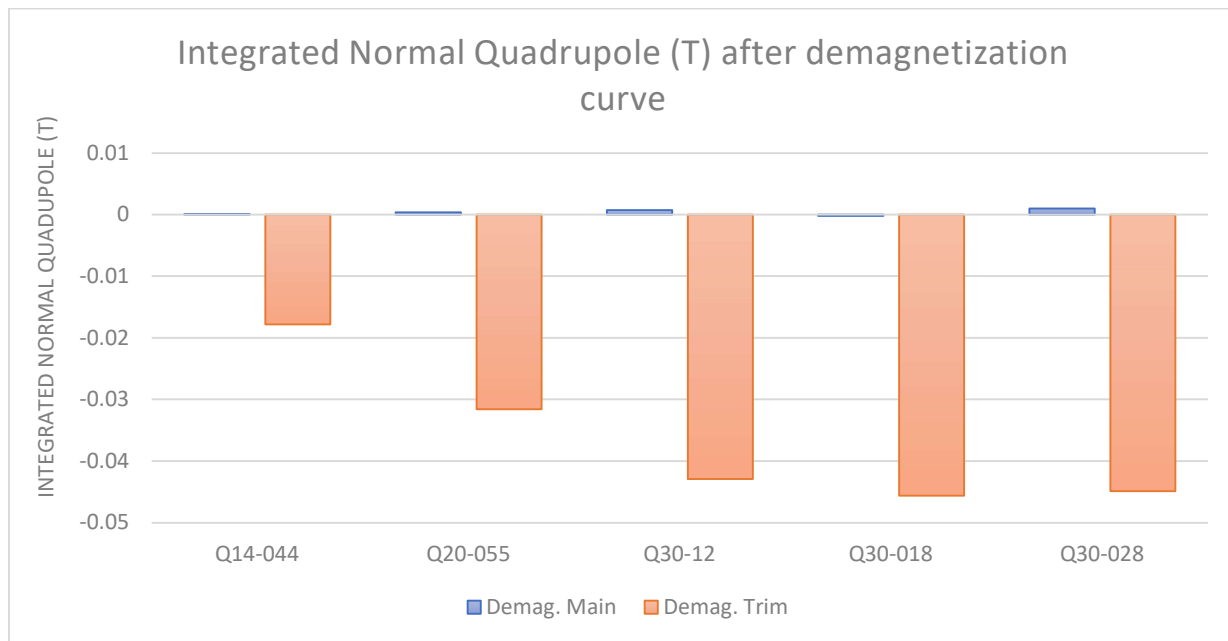


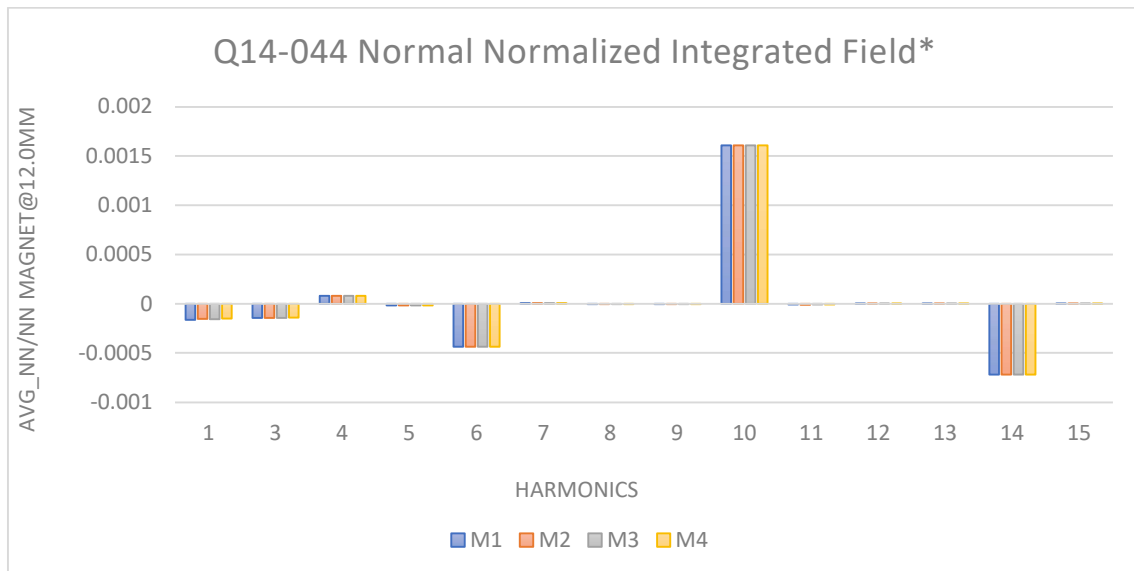
Tabela 11: Valores dos quadrupolos integrados para cada tipo de ímã e após cada desmagnetização.

| | Q14-044 | Q20-055 | Q30-012 | Q30-018 | Q30-028 | unit |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|------|
| Demag. Main | 0.000129 | 0.000387 | 0.000726 | -0.00019 | 0.000993 | T |
| Demag. Trim | -0.01783 | -0.03159 | -0.04288 | -0.04559 | -0.04487 | T |

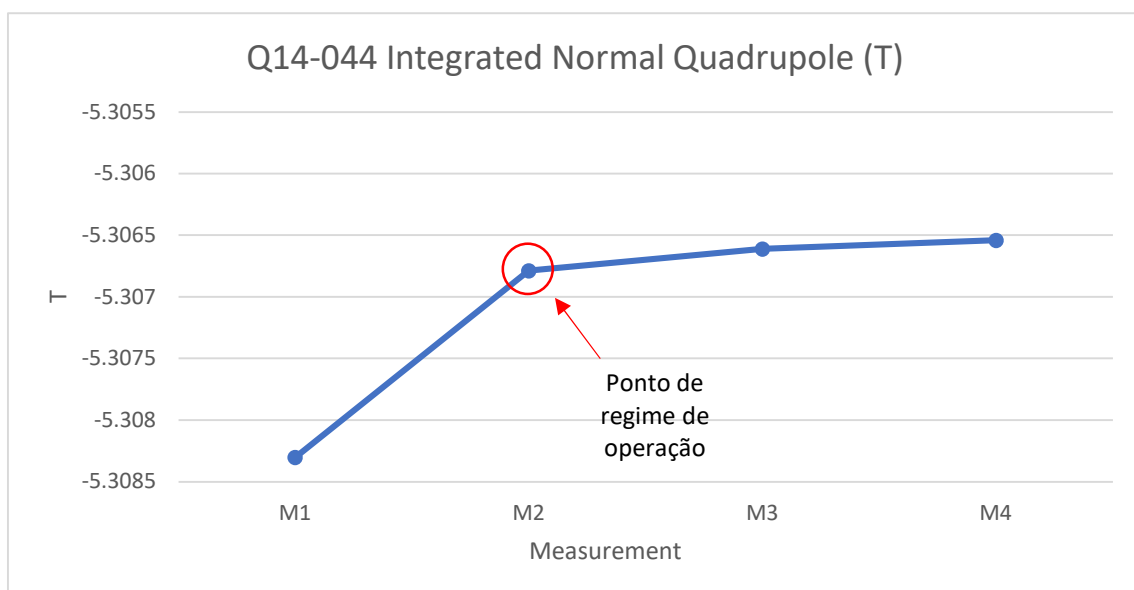
ETAPA 3 - Testar o regime de operação

Para a etapa 3, o regime de operação foi estimado comparando-se entre si o quadrupolo integrado diretamente de cada medida

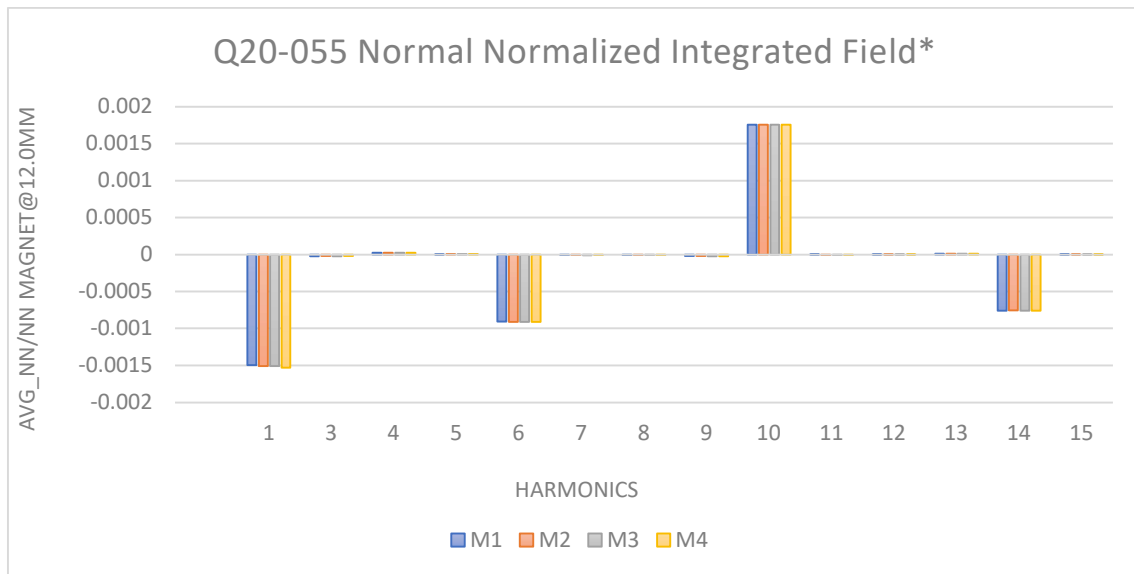
- Q14-044



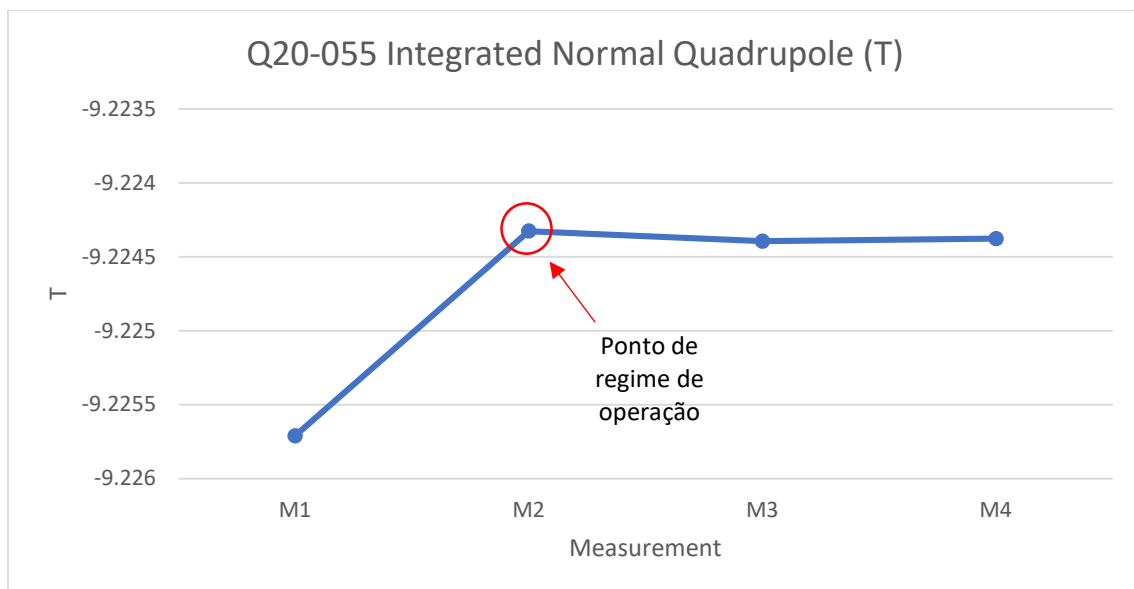
*O harmônico quadrupolar normalizado foi suprimido para facilitar a visualização dos demais.



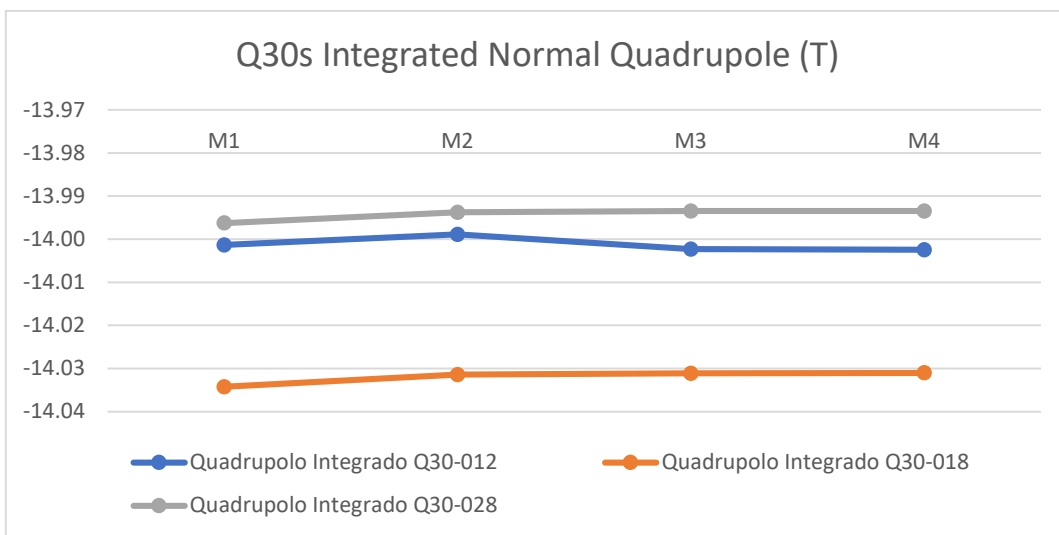
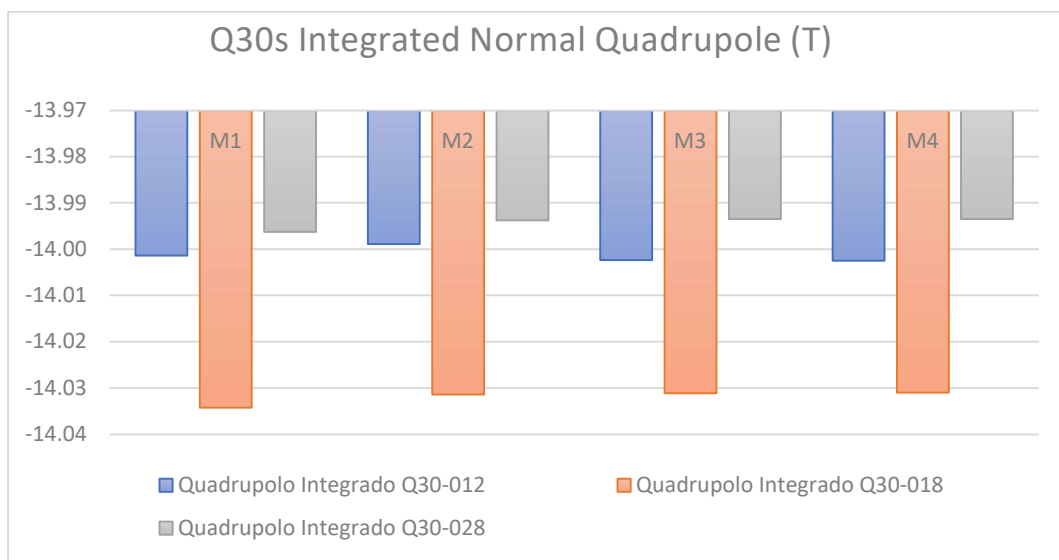
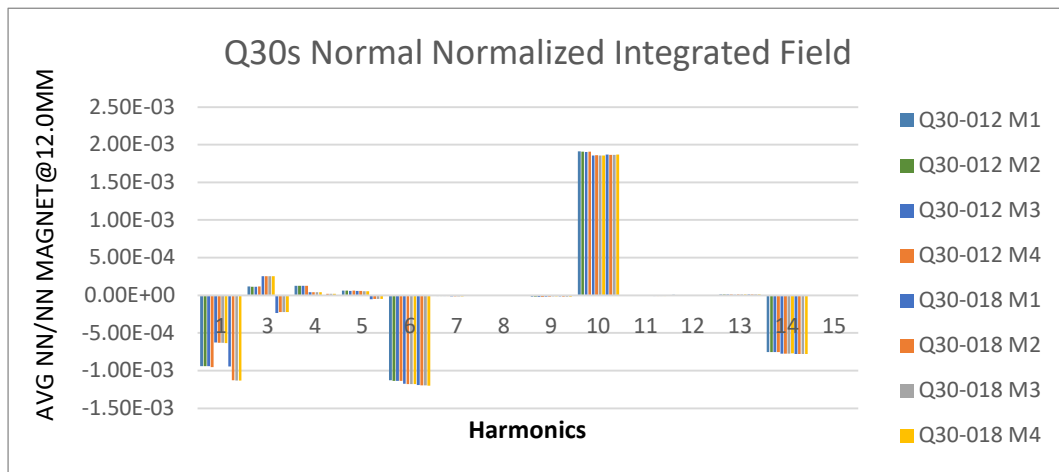
- Q20-055



*O harmônico quadrupolar normalizado foi suprimido para facilitar a visualização dos demais.



- Q30 (012, 018, 028)

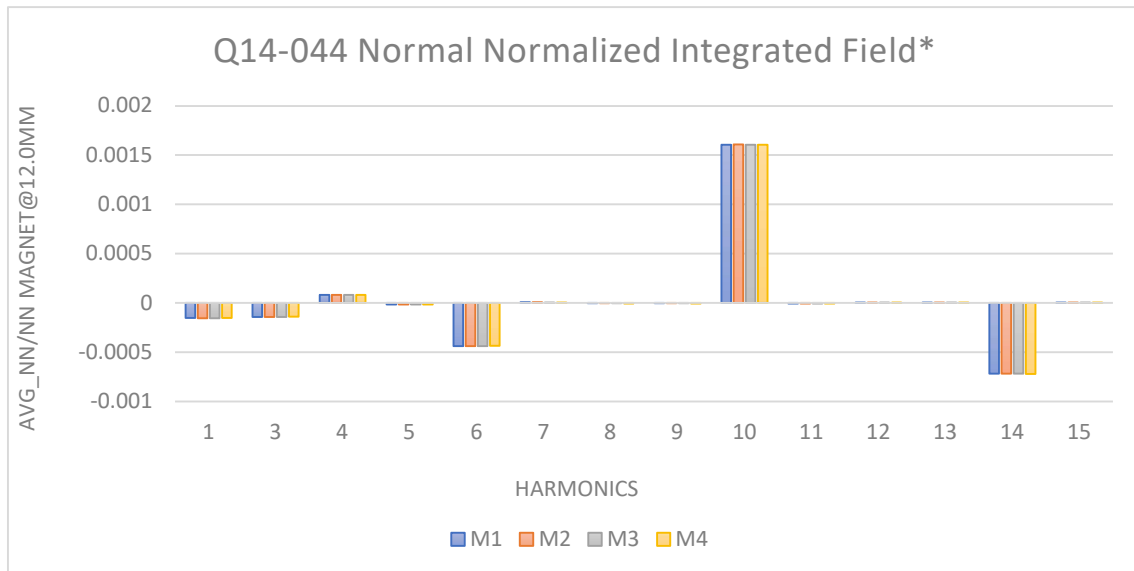


Conclusão: O regime de operação é alcançado a partir do segundo valor nominal de corrente como mostra o gráfico ao acima. Isto é, o ímã atinge seu ciclo de trabalho após a primeira excitação.

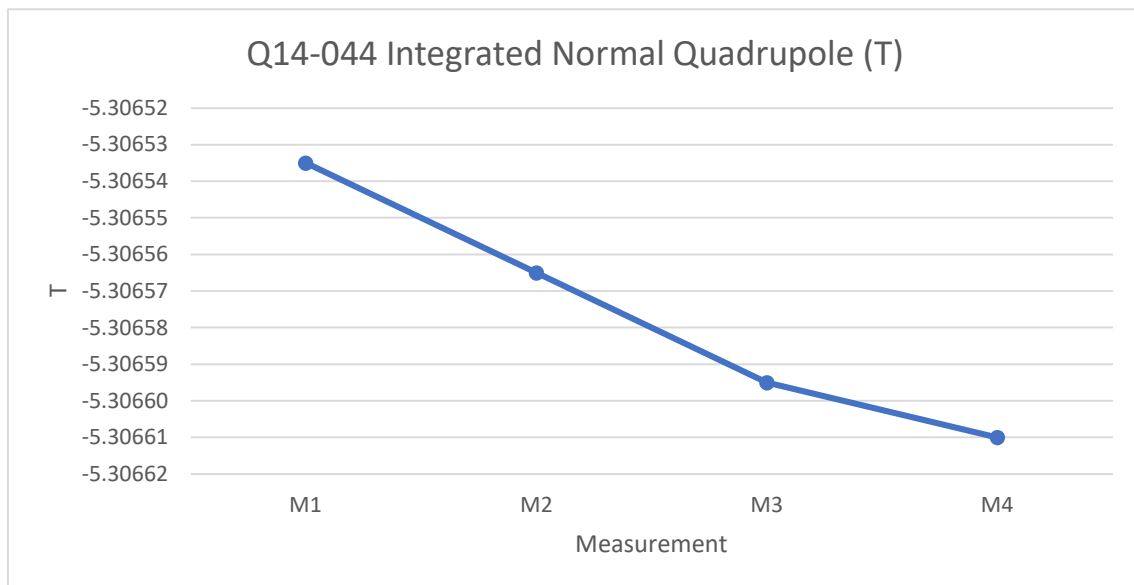
ETAPA 3.1 - Testar desmagnetização bobina trim + ciclagem bobina principal

- Q14-044

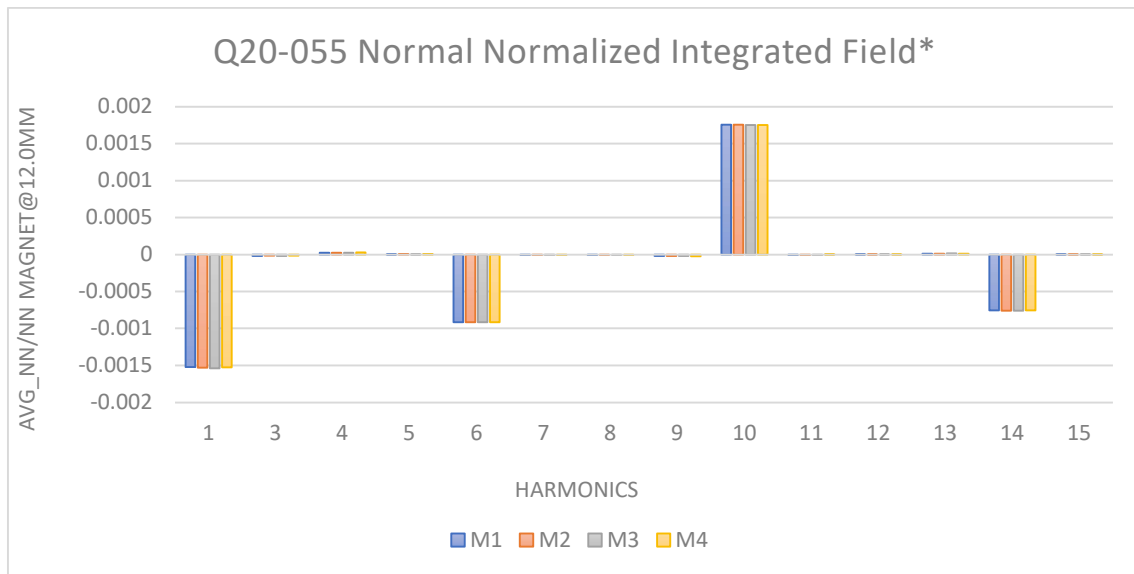
A proposta é a mesma da operação anterior, porém dessa vez, incluímos a ciclagem da bobina trim na sequência de ciclagens.



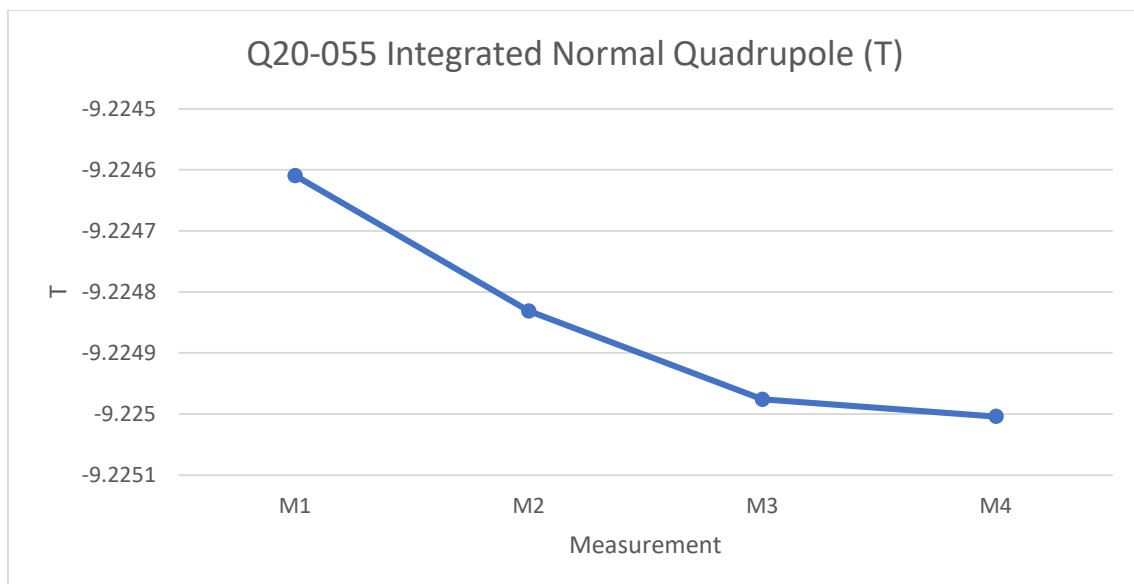
*O harmônico quadrupolar normalizado foi suprimido para facilitar a visualização dos demais.



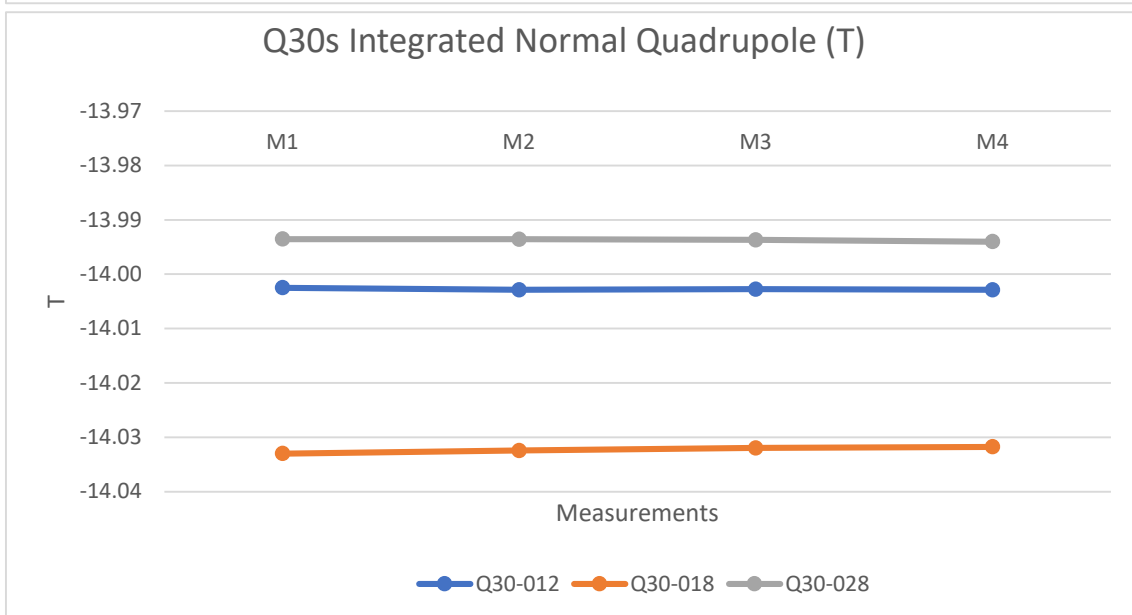
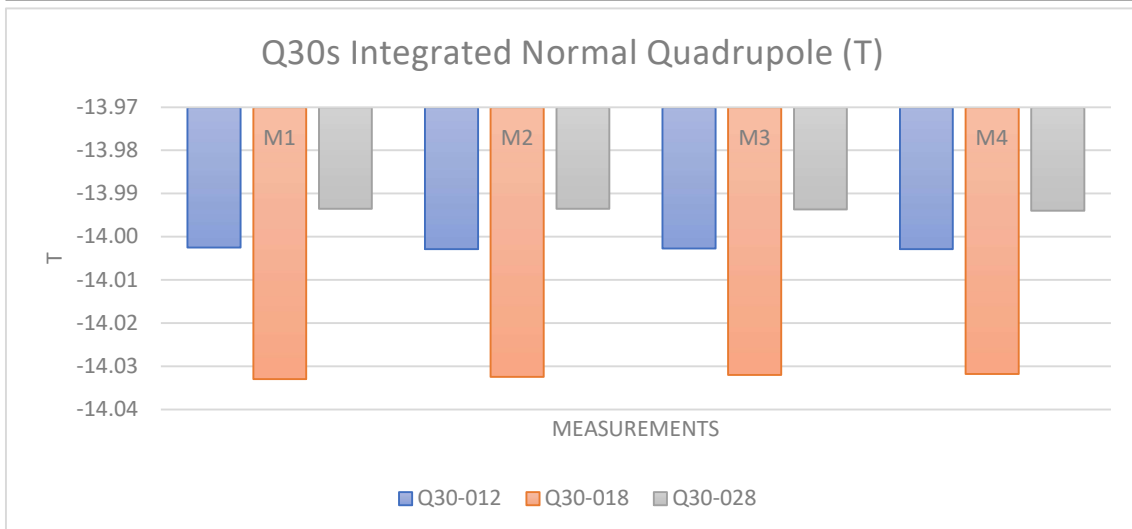
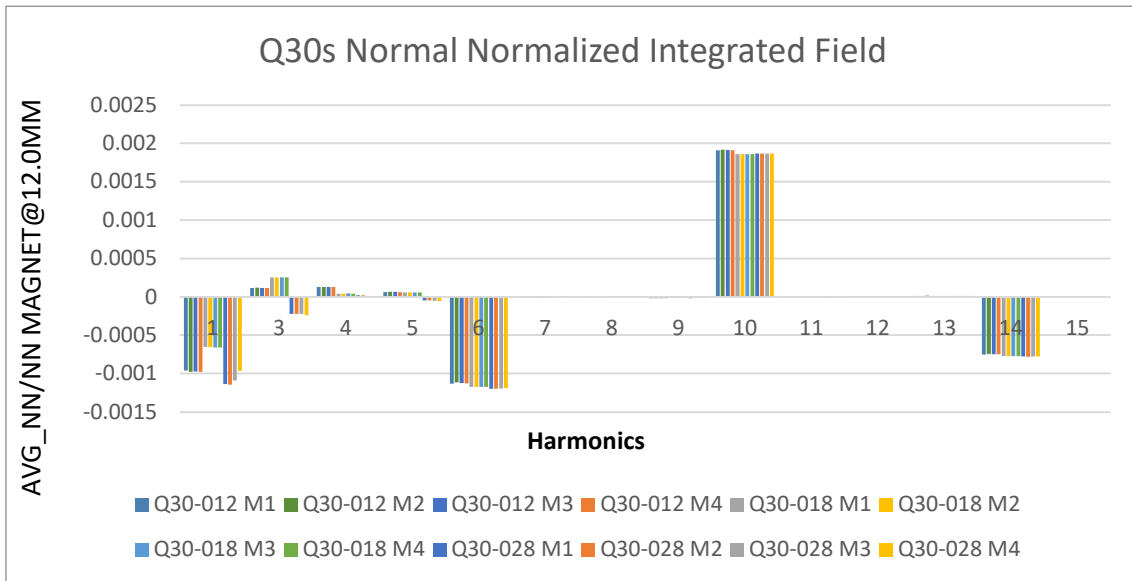
- Q20-055



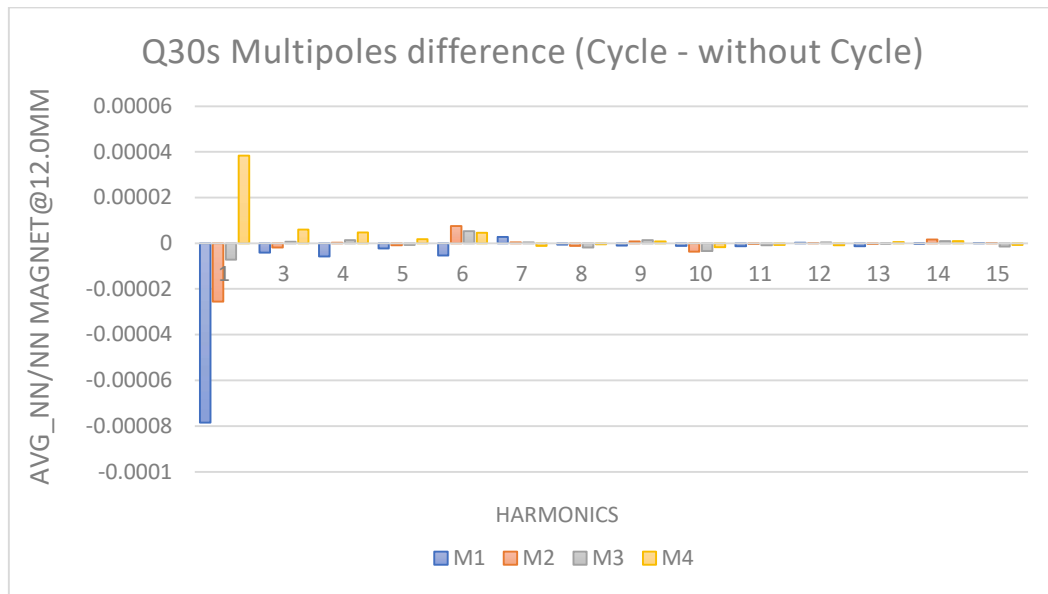
*O harmônico quadrupolar normalizado foi suprimido para facilitar a visualização dos demais.



- Q30 (012, 018, 028)



Conclusão: O regime de operação, quando se inclui as ciclagens, começa desde a **primeira excitação** em corrente nominal. Com relação aos multipolos, pouca mudança acontece entre o processo com e sem ciclagem.

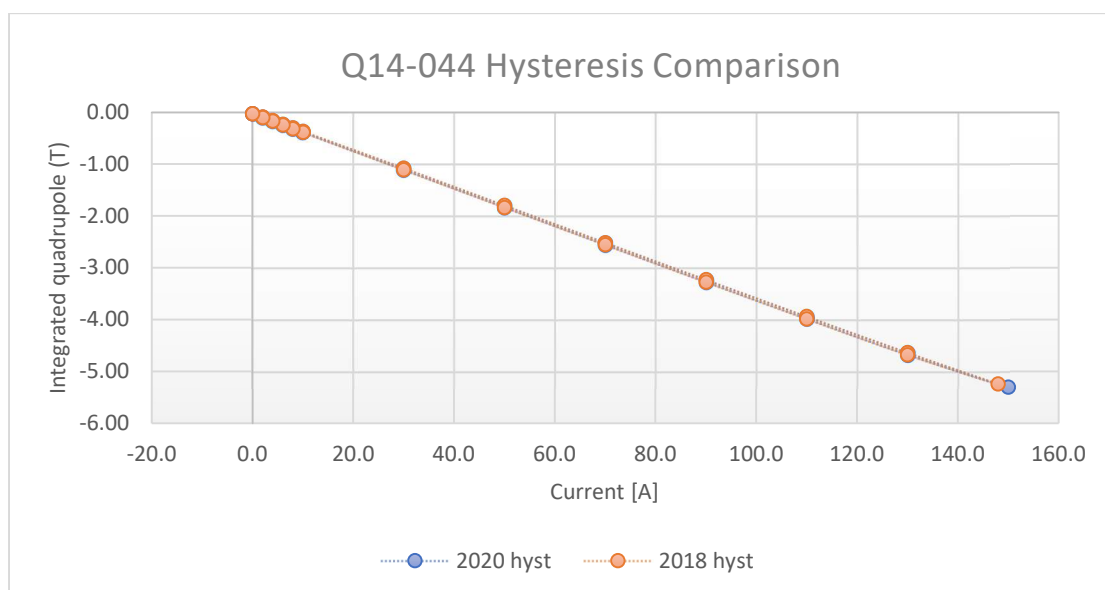


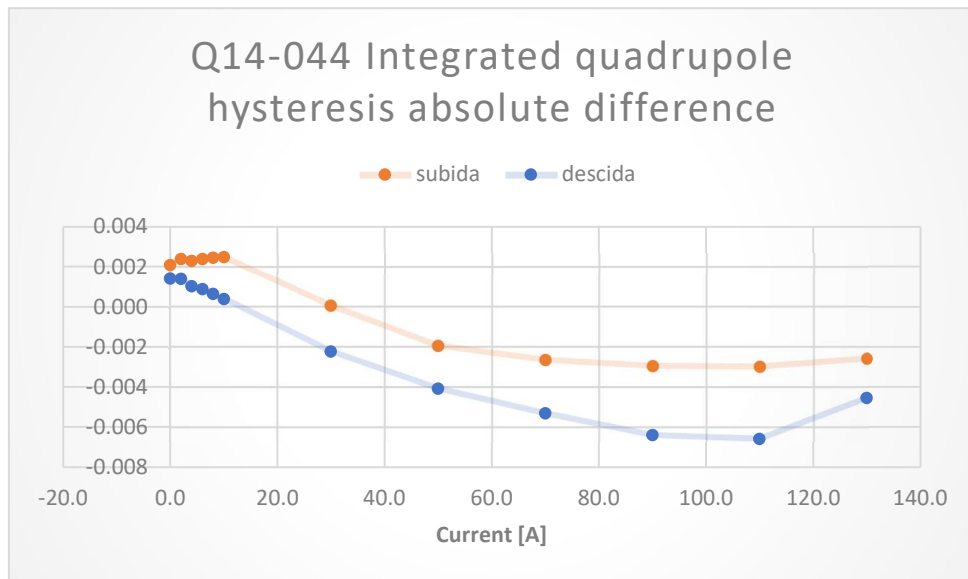
ETAPA 4 – Curvas de excitação da bobina principal

Hysteresis Excitation Measurement Q14-044 - Integrated Normal Quadrupole [T]

| 2020 | | 2018 | | diff(%) |
|--------|----------|--------|----------|---------|
| I | hyst | I | hyst | |
| 0.0 | -0.03047 | 0.0 | -0.02838 | 7.37% |
| 2.0 | -0.09721 | 2.0 | -0.09482 | 2.52% |
| 4.0 | -0.1651 | 4.0 | -0.16282 | 1.40% |
| 6.0 | -0.23369 | 6.0 | -0.23131 | 1.03% |
| 8.0 | -0.30274 | 8.0 | -0.30029 | 0.82% |
| 10.0 | -0.37217 | 10.0 | -0.36968 | 0.67% |
| 30.0 | -1.07826 | 30.0 | -1.07822 | 0.00% |
| 50.0 | -1.79509 | 50.0 | -1.79704 | -0.11% |
| 70.0 | -2.51356 | 70.0 | -2.51622 | -0.11% |
| 90.0 | -3.22855 | 90.0 | -3.23151 | -0.09% |
| 110.0 | -3.93603 | 110.0 | -3.93903 | -0.08% |
| 130.0 | -4.63224 | 130.0 | -4.63483 | -0.06% |
| *150.0 | -5.3062 | *148.0 | -5.23877 | --- |
| 130.0 | -4.67237 | 130.0 | -4.67691 | -0.10% |
| 110.0 | -3.97891 | 110.0 | -3.98549 | -0.17% |
| 90.0 | -3.26984 | 90.0 | -3.27624 | -0.20% |
| 70.0 | -2.55333 | 70.0 | -2.55865 | -0.21% |
| 50.0 | -1.83305 | 50.0 | -1.83712 | -0.22% |
| 30.0 | -1.11161 | 30.0 | -1.11384 | -0.20% |
| 10.0 | -0.39061 | 10.0 | -0.39022 | 0.10% |
| 8.0 | -0.31873 | 8.0 | -0.31809 | 0.20% |
| 6.0 | -0.24677 | 6.0 | -0.24588 | 0.36% |
| 4.0 | -0.17465 | 4.0 | -0.17362 | 0.60% |
| 2.0 | -0.10267 | 2.0 | -0.10127 | 1.38% |
| 0.0 | -0.03058 | 0.0 | -0.02916 | 4.87% |

*Correntes nominais diferentes.



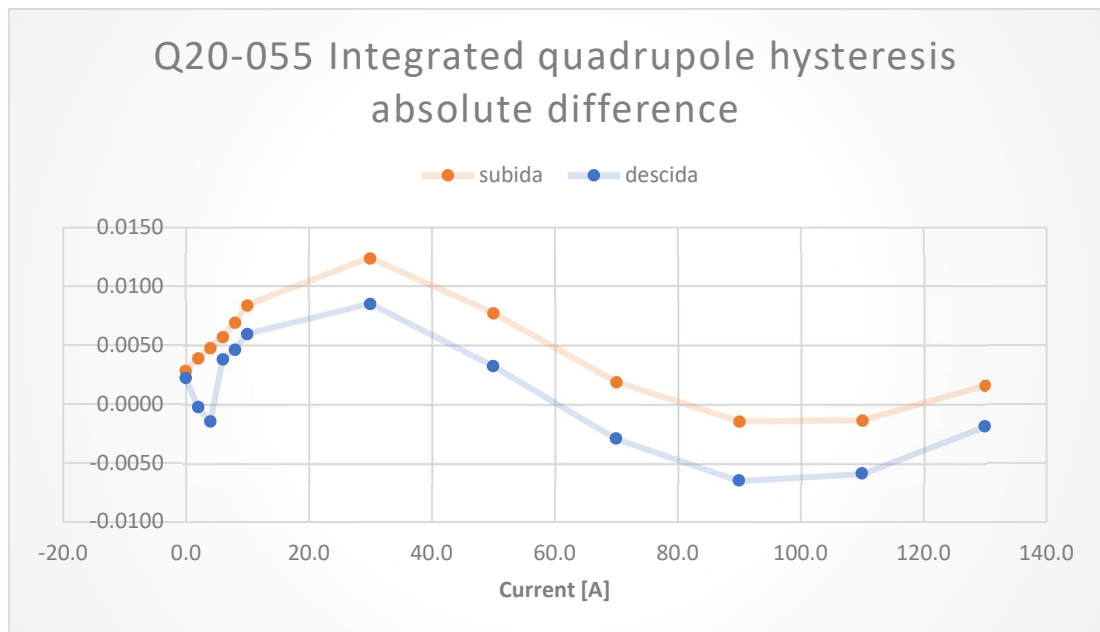
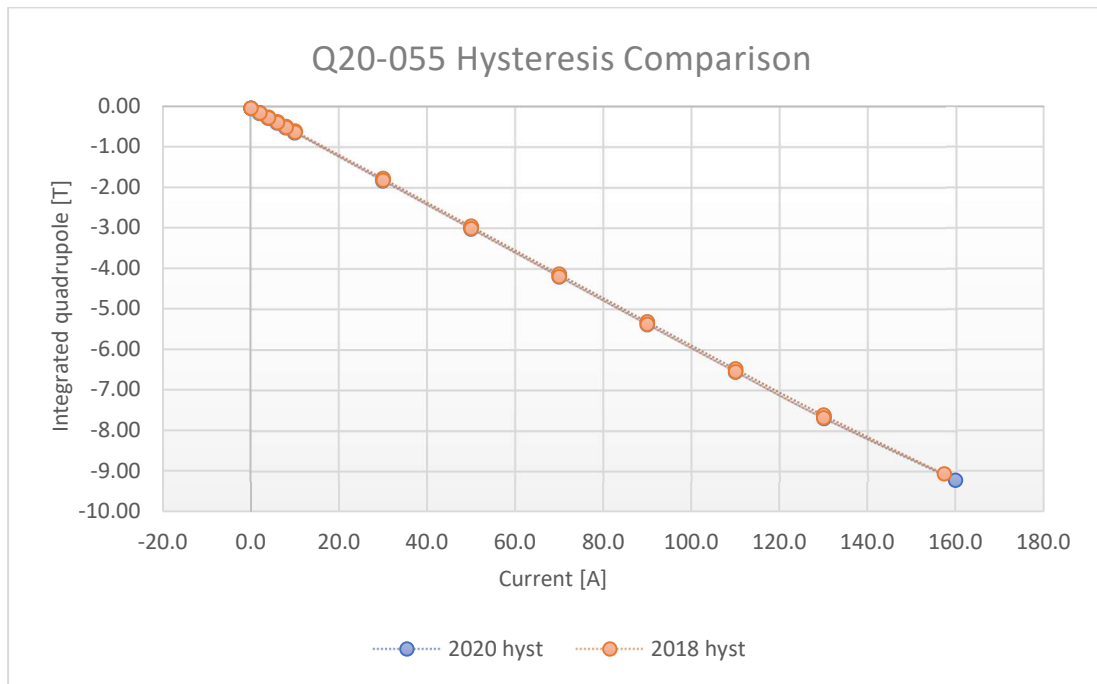


Hysteresis Excitation Measurement Q20-055

Integrated Normal Quadrupole [T]

| 2020 | | 2018 | | diff(%) |
|--------|---------|--------|----------|---------|
| I | hyst | I | hyst | |
| 0.0 | -0.0435 | 0.0 | -0.04063 | -6.57% |
| 2.0 | -0.1549 | 2.0 | -0.15096 | -2.53% |
| 4.0 | -0.2681 | 4.0 | -0.26335 | -1.79% |
| 6.0 | -0.3823 | 6.0 | -0.37656 | -1.49% |
| 8.0 | -0.4974 | 8.0 | -0.49046 | -1.39% |
| 10.0 | -0.6134 | 10.0 | -0.60503 | -1.37% |
| 30.0 | -1.7841 | 30.0 | -1.77172 | -0.69% |
| 50.0 | -2.9614 | 50.0 | -2.95363 | -0.26% |
| 70.0 | -4.1385 | 70.0 | -4.13658 | -0.05% |
| 90.0 | -5.3123 | 90.0 | -5.31367 | 0.03% |
| 110.0 | -6.4747 | 110.0 | -6.47601 | 0.02% |
| 130.0 | -7.6178 | 130.0 | -7.6162 | -0.02% |
| *160.0 | -9.2228 | *157.4 | -9.06916 | --- |
| 130.0 | -7.6857 | 130.0 | -7.68753 | 0.02% |
| 110.0 | -6.5389 | 110.0 | -6.54481 | 0.09% |
| 90.0 | -5.3709 | 90.0 | -5.37738 | 0.12% |
| 70.0 | -4.1941 | 70.0 | -4.19698 | 0.07% |
| 50.0 | -3.0141 | 50.0 | -3.01085 | -0.11% |
| 30.0 | -1.8313 | 30.0 | -1.82282 | -0.47% |
| 10.0 | -0.6407 | 10.0 | -0.63475 | -0.93% |
| 8.0 | -0.5209 | 8.0 | -0.51624 | -0.89% |
| 6.0 | -0.4015 | 6.0 | -0.39763 | -0.95% |
| 4.0 | -0.2775 | 4.0 | -0.27899 | 0.53% |
| 2.0 | -0.1600 | 2.0 | -0.16021 | 0.15% |
| 0.0 | -0.0441 | 0.0 | -0.04186 | -5.05% |

*Correntes nominais diferentes.

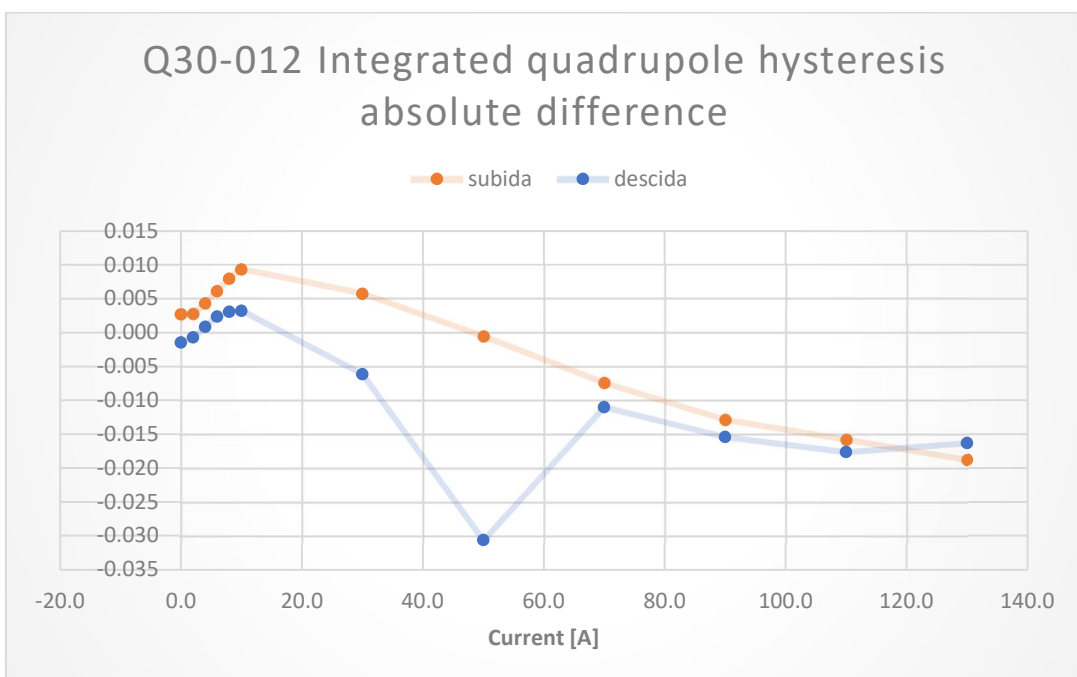
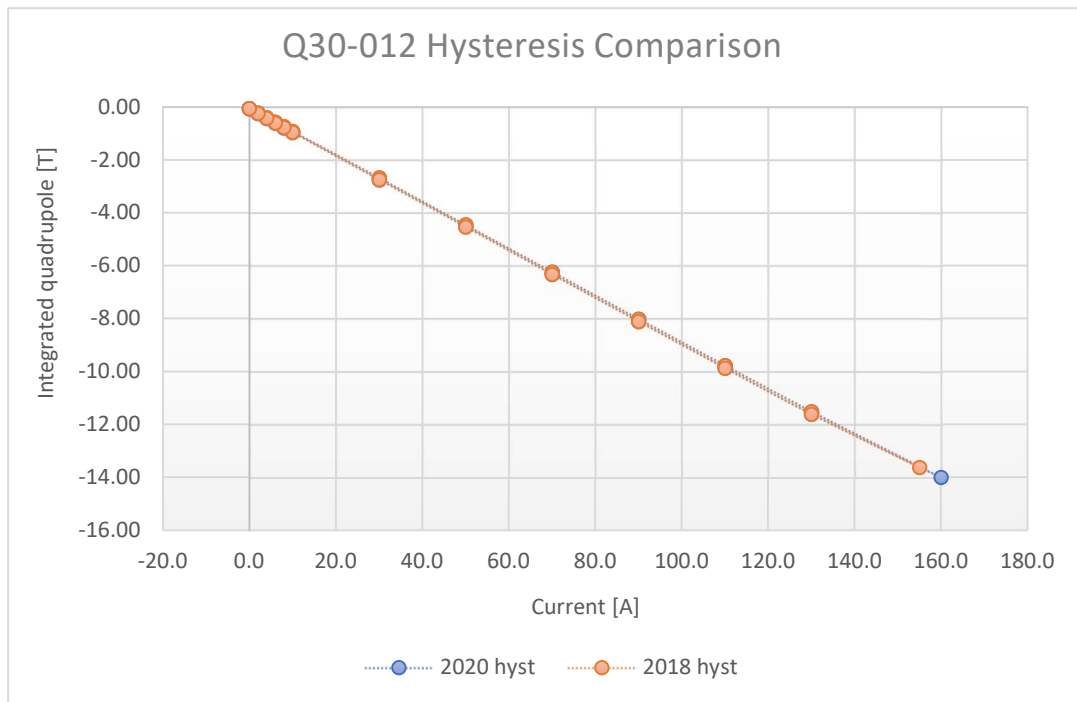


Hysteresis Excitation Measurement Q30-012

Integrated Normal Quadrupole [T]

| 2020 | | 2018 | | diff(%) |
|--------|----------|--------|----------|---------|
| I[A] | hyst | I [A] | hyst | |
| 0.0 | -0.0603 | 0.0 | -0.0576 | -4.50% |
| 2.0 | -0.2279 | 2.0 | -0.22518 | -1.21% |
| 4.0 | -0.3995 | 4.0 | -0.39519 | -1.08% |
| 6.0 | -0.5723 | 6.0 | -0.56626 | -1.06% |
| 8.0 | -0.7463 | 8.0 | -0.73836 | -1.06% |
| 10.0 | -0.9207 | 10.0 | -0.91142 | -1.01% |
| 30.0 | -2.6774 | 30.0 | -2.67168 | -0.21% |
| 50.0 | -4.4524 | 50.0 | -4.45292 | 0.01% |
| 70.0 | -6.2295 | 70.0 | -6.23691 | 0.12% |
| 90.0 | -8.0027 | 90.0 | -8.01553 | 0.16% |
| 110.0 | -9.7633 | 110.0 | -9.7791 | 0.16% |
| 130.0 | -11.5005 | 130.0 | -11.5193 | 0.16% |
| *160.0 | -13.9976 | *155.0 | -13.623 | --- |
| 130.0 | -11.5941 | 130.0 | -11.6104 | 0.14% |
| 110.0 | -9.8540 | 110.0 | -9.87165 | 0.18% |
| 90.0 | -8.0883 | 90.0 | -8.10377 | 0.19% |
| 70.0 | -6.3105 | 70.0 | -6.32149 | 0.17% |
| 50.0 | -4.5024 | 50.0 | -4.53304 | 0.68% |
| 30.0 | -2.7365 | 30.0 | -2.74266 | 0.22% |
| 10.0 | -0.9554 | 10.0 | -0.9522 | -0.34% |
| 8.0 | -0.7766 | 8.0 | -0.77355 | -0.39% |
| 6.0 | -0.5972 | 6.0 | -0.59488 | -0.39% |
| 4.0 | -0.4170 | 4.0 | -0.41614 | -0.21% |
| 2.0 | -0.2365 | 2.0 | -0.2372 | 0.30% |
| 0.0 | -0.0575 | 0.0 | -0.05892 | 2.53% |

*Correntes nominais diferentes.

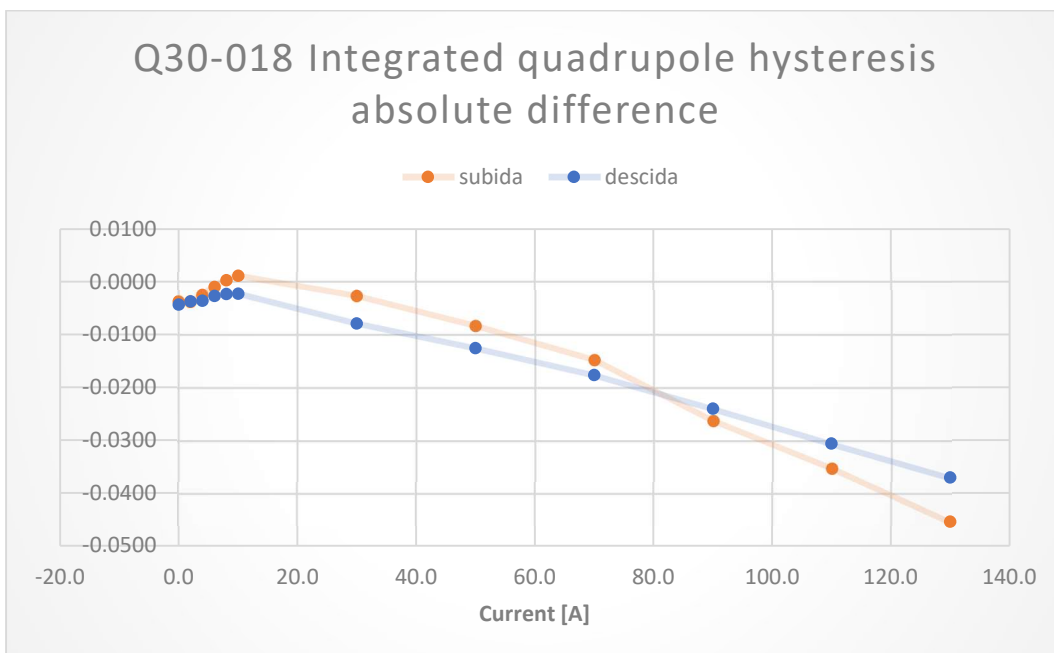
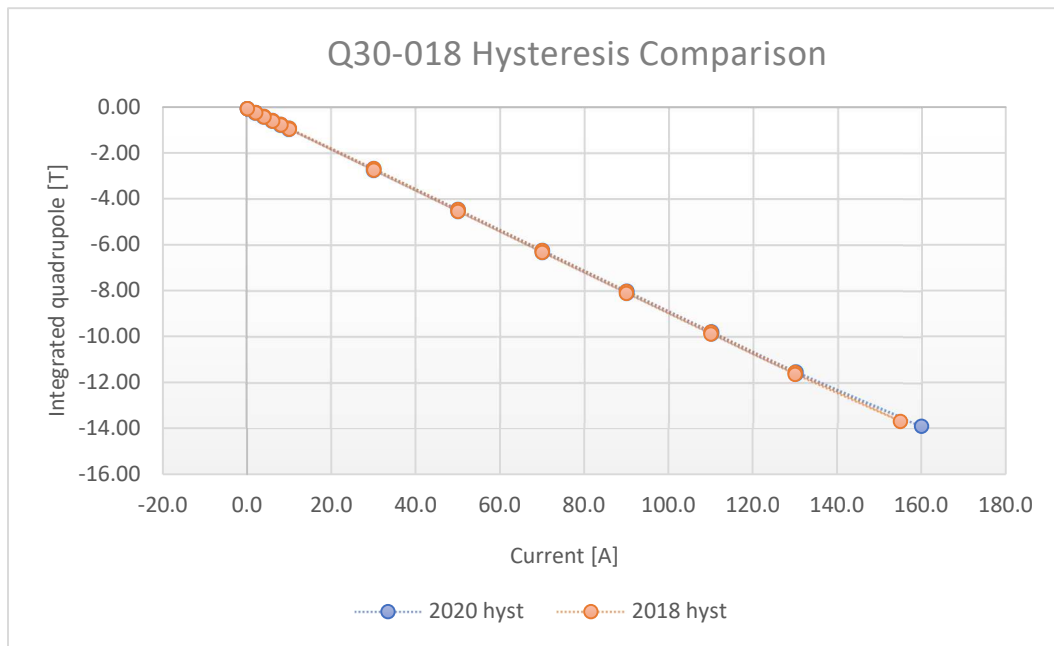


Hysteresis Excitation Measurement Q30-018

Integrated Normal Quadrupole [T]

| 2020 | | 2018 | | diff(%) |
|--------|----------|--------|----------|---------|
| I | hyst | I | hyst | |
| 0.0 | -0.06219 | 0.0 | -0.0659 | -5.63% |
| 2.0 | -0.22909 | 2.0 | -0.23291 | -1.64% |
| 4.0 | -0.39996 | 4.0 | -0.4025 | -0.63% |
| 6.0 | -0.5722 | 6.0 | -0.57323 | -0.18% |
| 8.0 | -0.74532 | 8.0 | -0.74503 | 0.04% |
| 10.0 | -0.91892 | 10.0 | -0.9178 | 0.12% |
| 30.0 | -2.67353 | 30.0 | -2.67621 | -0.10% |
| 50.0 | -4.44914 | 50.0 | -4.45751 | -0.19% |
| 70.0 | -6.23022 | 70.0 | -6.24503 | -0.24% |
| 90.0 | -8.00477 | 90.0 | -8.03104 | -0.33% |
| 110.0 | -9.76981 | 110.0 | -9.80502 | -0.36% |
| 130.0 | -11.5131 | 130.0 | -11.5586 | -0.39% |
| *160.0 | -13.899 | *155.0 | -13.6954 | --- |
| 130.0 | -11.6025 | 130.0 | -11.6396 | -0.32% |
| 110.0 | -9.85851 | 110.0 | -9.88922 | -0.31% |
| 90.0 | -8.08972 | 90.0 | -8.11381 | -0.30% |
| 70.0 | -6.30922 | 70.0 | -6.32694 | -0.28% |
| 50.0 | -4.52407 | 50.0 | -4.53668 | -0.28% |
| 30.0 | -2.73849 | 30.0 | -2.74641 | -0.29% |
| 10.0 | -0.95488 | 10.0 | -0.95717 | -0.24% |
| 8.0 | -0.77667 | 8.0 | -0.77898 | -0.30% |
| 6.0 | -0.59796 | 6.0 | -0.60064 | -0.45% |
| 4.0 | -0.41855 | 4.0 | -0.42217 | -0.86% |
| 2.0 | -0.23975 | 2.0 | -0.24349 | -1.54% |
| 0.0 | -0.06114 | 0.0 | -0.06547 | -6.62% |

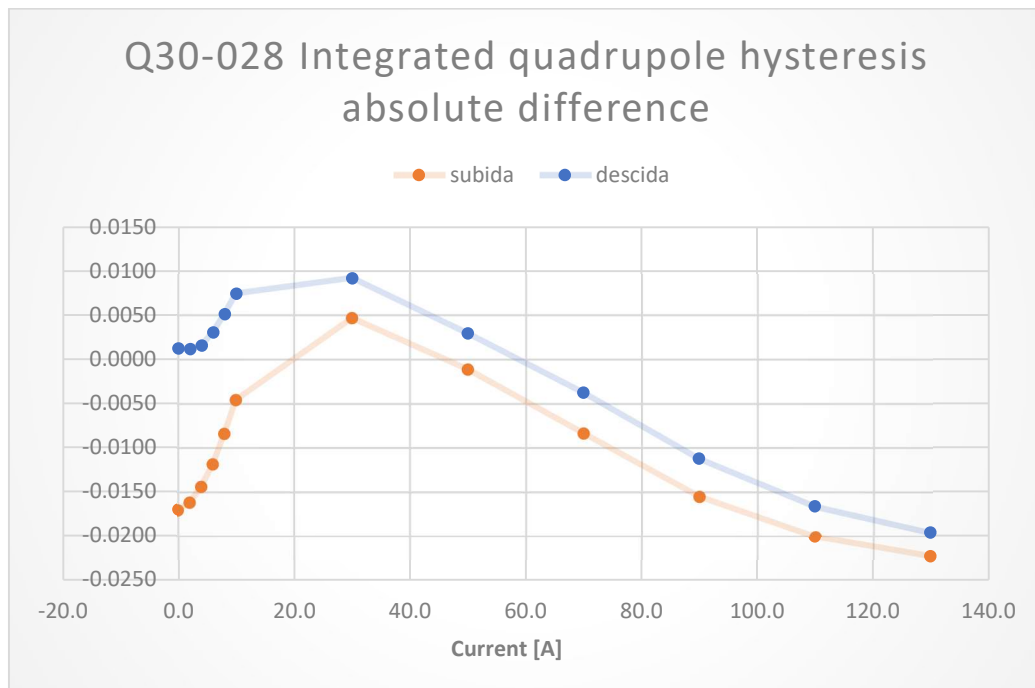
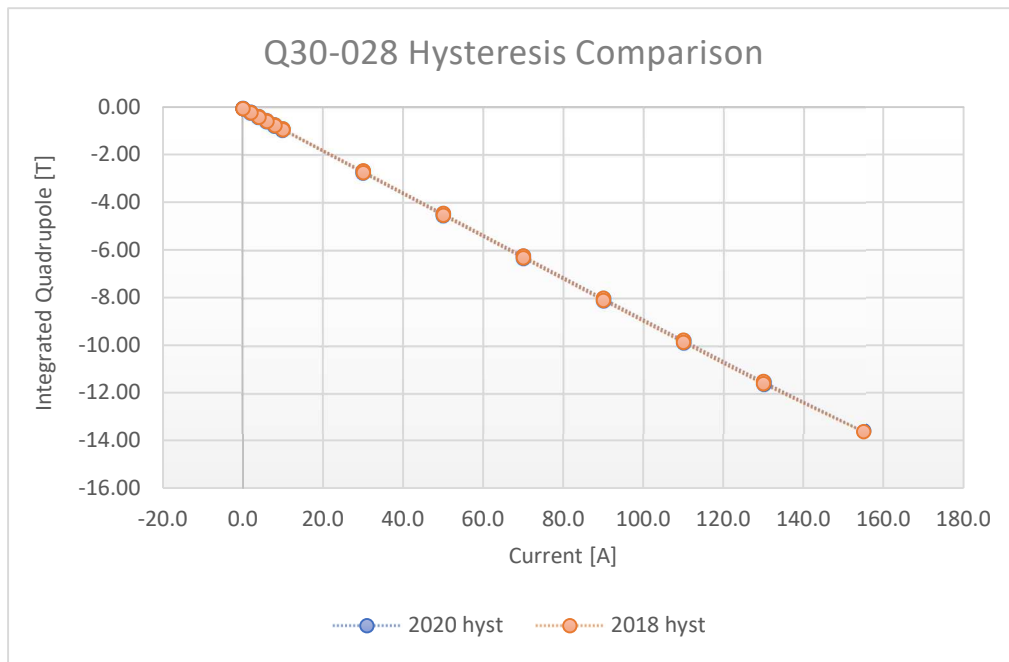
*Correntes nominais diferentes.



Hysteresis Excitation Measurement Q30-028

Integrated Normal Quadrupole [T]

| 2020 | | 2018 | | diff(%) |
|-------|----------|-------|----------|---------|
| I | hyst | I | hyst | |
| 0.0 | -0.0418 | 0.0 | -0.05884 | -28.97% |
| 2.0 | -0.21009 | 2.0 | -0.22626 | -7.14% |
| 4.0 | -0.38177 | 4.0 | -0.39616 | -3.63% |
| 6.0 | -0.55538 | 6.0 | -0.56721 | -2.08% |
| 8.0 | -0.73088 | 8.0 | -0.73928 | -1.14% |
| 10.0 | -0.90774 | 10.0 | -0.91231 | -0.50% |
| 30.0 | -2.67772 | 30.0 | -2.67304 | 0.17% |
| 50.0 | -4.45376 | 50.0 | -4.4549 | -0.03% |
| 70.0 | -6.23093 | 70.0 | -6.23928 | -0.13% |
| 90.0 | -8.002 | 90.0 | -8.0175 | -0.19% |
| 110.0 | -9.75915 | 110.0 | -9.77922 | -0.21% |
| 130.0 | -11.4945 | 130.0 | -11.5168 | -0.19% |
| 155.0 | -13.588 | 155.0 | -13.6169 | -0.21% |
| 130.0 | -11.5902 | 130.0 | -11.6099 | -0.17% |
| 110.0 | -9.85719 | 110.0 | -9.87386 | -0.17% |
| 90.0 | -8.09599 | 90.0 | -8.10724 | -0.14% |
| 70.0 | -6.32116 | 70.0 | -6.32493 | -0.06% |
| 50.0 | -4.53873 | 50.0 | -4.5358 | 0.06% |
| 30.0 | -2.75397 | 30.0 | -2.74476 | 0.34% |
| 10.0 | -0.9612 | 10.0 | -0.95374 | 0.78% |
| 8.0 | -0.78018 | 8.0 | -0.77506 | 0.66% |
| 6.0 | -0.5994 | 6.0 | -0.59635 | 0.51% |
| 4.0 | -0.41913 | 4.0 | -0.41756 | 0.38% |
| 2.0 | -0.23975 | 2.0 | -0.23858 | 0.49% |
| 0.0 | -0.06147 | 0.0 | -0.06024 | 2.04% |

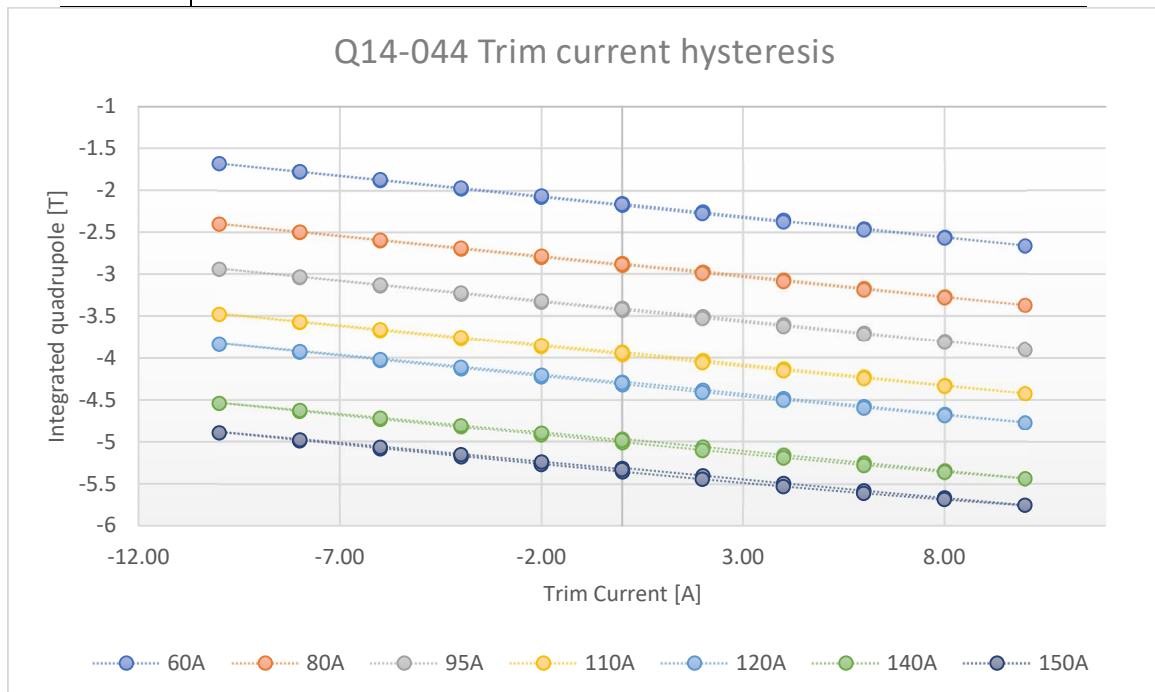


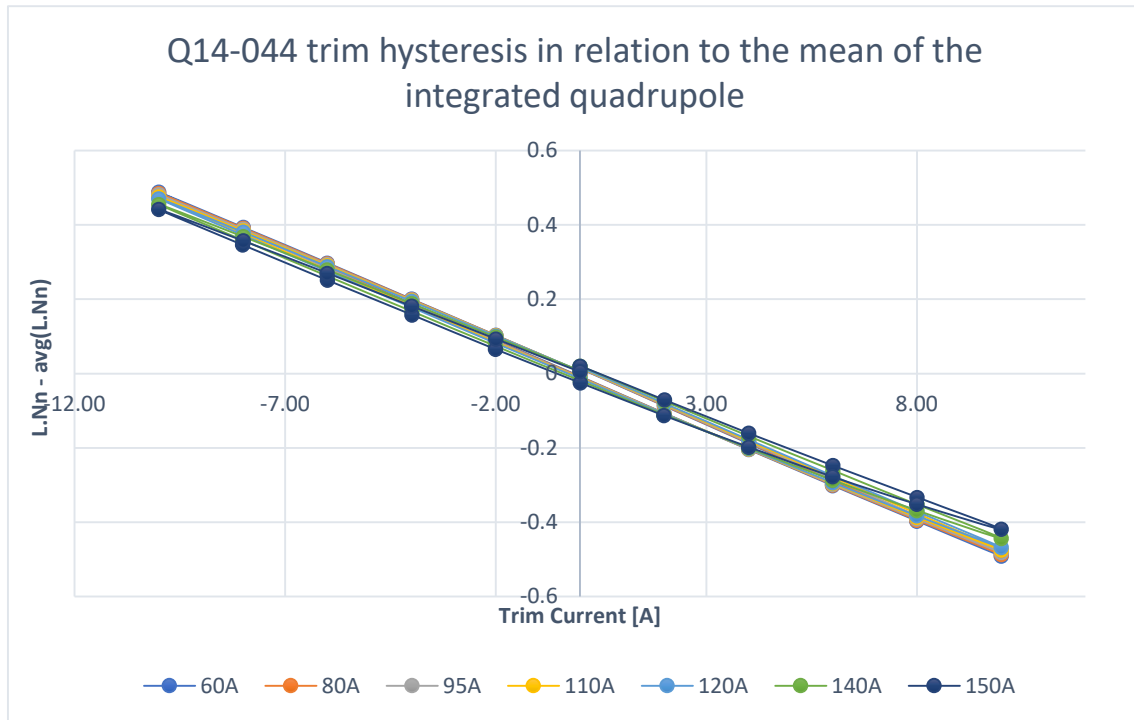
ETAPA 5 - Curva de excitação da bobina auxiliar (trim) para vários valores de corrente na bobina principal

Hysteresis Excitation Measurement – trim coil - Q14-044

Integrated Normal Quadrupole [T]

| trim [A] | main [A] | | | | | | |
|----------|----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| | 60A | 80A | 95 ^a | 110A | 120A | 140A | 150A |
| 0.00 | -2.15426 | -2.87154 | -3.40598 | -3.9354 | -4.28512 | -4.97283 | -5.31234 |
| 2.01 | -2.25509 | -2.97183 | -3.50552 | -4.03379 | -4.38265 | -5.06727 | -5.40334 |
| 4.01 | -2.35599 | -3.07213 | -3.60487 | -4.13222 | -4.48014 | -5.16111 | -5.49293 |
| 6.00 | -2.45687 | -3.17225 | -3.70409 | -4.23025 | -4.57718 | -5.25382 | -5.5801 |
| 8.01 | -2.55766 | -3.27226 | -3.80317 | -4.32801 | -4.67393 | -5.34564 | -5.66585 |
| 10.00 | -2.65829 | -3.37206 | -3.90189 | -4.4255 | -4.77014 | -5.43659 | -5.75162 |
| 8.00 | -2.56434 | -3.27964 | -3.81149 | -4.33786 | -4.68503 | -5.36145 | -5.68442 |
| 6.00 | -2.46855 | -3.18502 | -3.71832 | -4.2467 | -4.59581 | -5.2795 | -5.61035 |
| 4.00 | -2.37174 | -3.08915 | -3.62361 | -4.15356 | -4.50411 | -5.19317 | -5.53044 |
| 1.99 | -2.27419 | -2.99239 | -3.52778 | -4.0591 | -4.41068 | -5.10373 | -5.44563 |
| 0.01 | -2.17603 | -2.89489 | -3.43108 | -3.96353 | -4.31607 | -5.01242 | -5.35766 |
| -2.00 | -2.07769 | -2.7971 | -3.33385 | -3.86752 | -4.2207 | -4.91965 | -5.26734 |
| -3.99 | -1.97884 | -2.6988 | -3.23597 | -3.77035 | -4.12452 | -4.82567 | -5.17494 |
| -6.00 | -1.87921 | -2.59957 | -3.13736 | -3.67248 | -4.02731 | -4.73044 | -5.08106 |
| -8.01 | -1.77934 | -2.50007 | -3.03833 | -3.57432 | -3.92967 | -4.63448 | -4.98648 |
| -10.00 | -1.67912 | -2.40017 | -2.93916 | -3.47557 | -3.83144 | -4.53791 | -4.8909 |
| -8.00 | -1.77383 | -2.49422 | -3.03222 | -3.5672 | -3.92175 | -4.62466 | -4.97535 |
| -6.00 | -1.86999 | -2.58974 | -3.12693 | -3.66063 | -4.01407 | -4.71386 | -5.06256 |
| -4.00 | -1.96714 | -2.68621 | -3.22266 | -3.75513 | -4.10761 | -4.80441 | -5.15103 |
| -2.00 | -2.06427 | -2.7828 | -3.31845 | -3.84963 | -4.20115 | -4.895 | -5.23946 |
| 0.00 | -2.16201 | -2.87981 | -3.41452 | -3.94465 | -4.29513 | -4.98569 | -5.32757 |

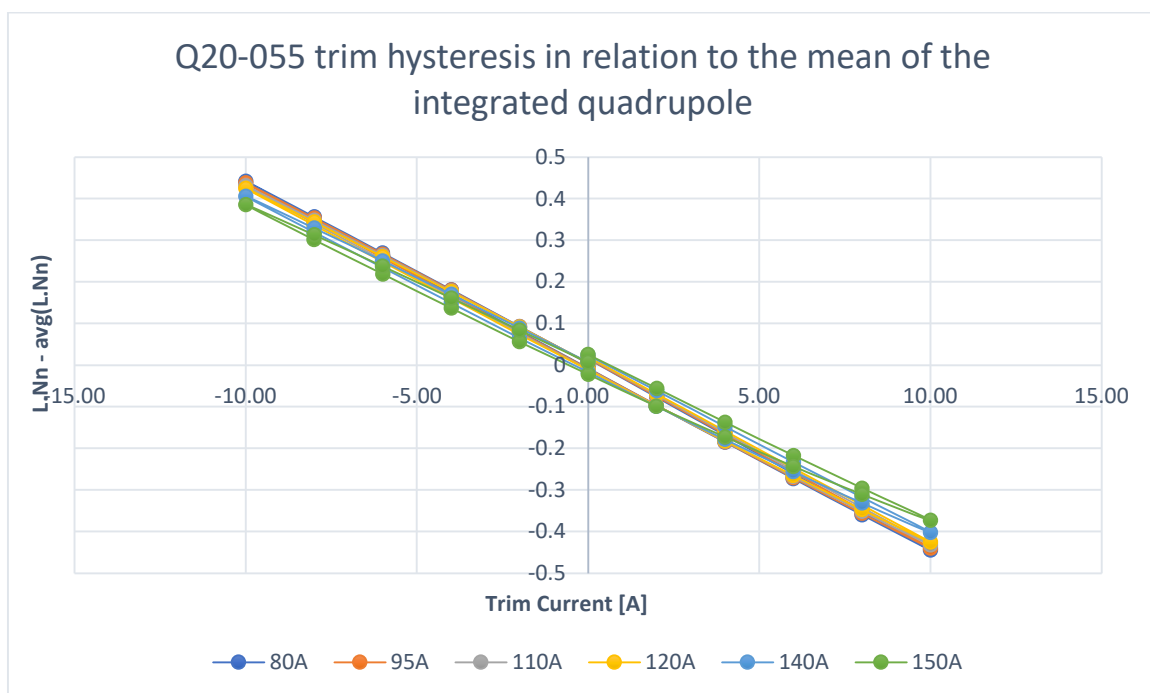
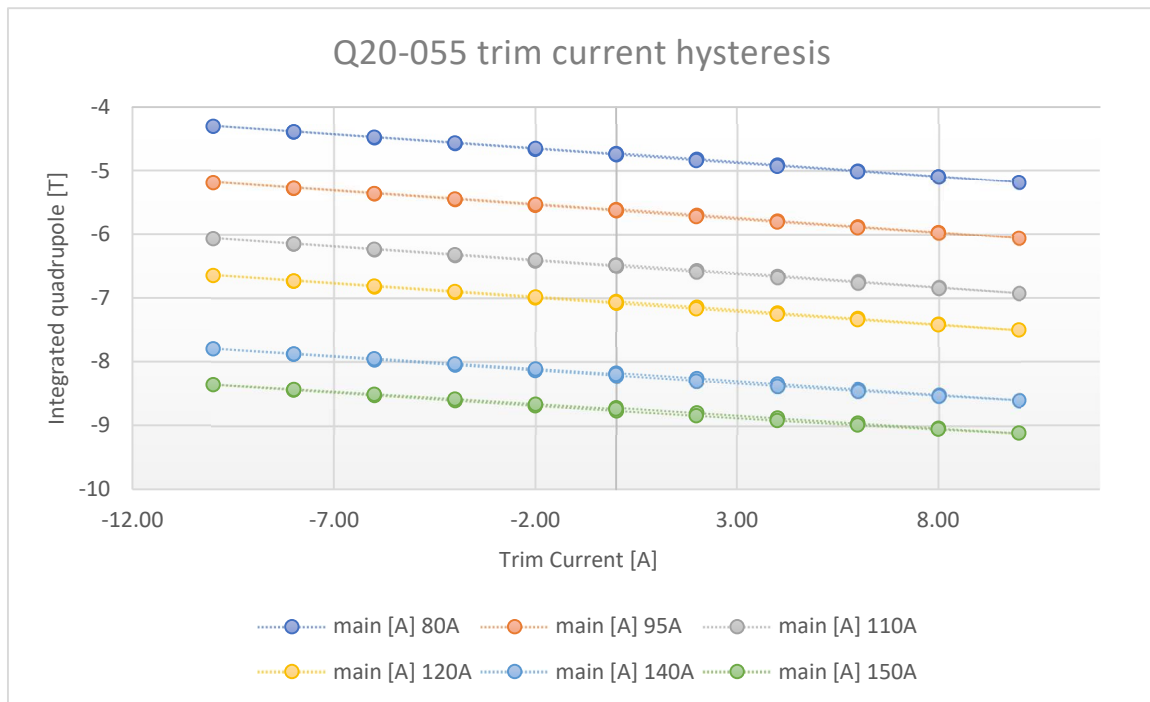




Hysteresis Excitation Measurement – trim coil – Q20-055

Integrated Normal Quadrupole [T]

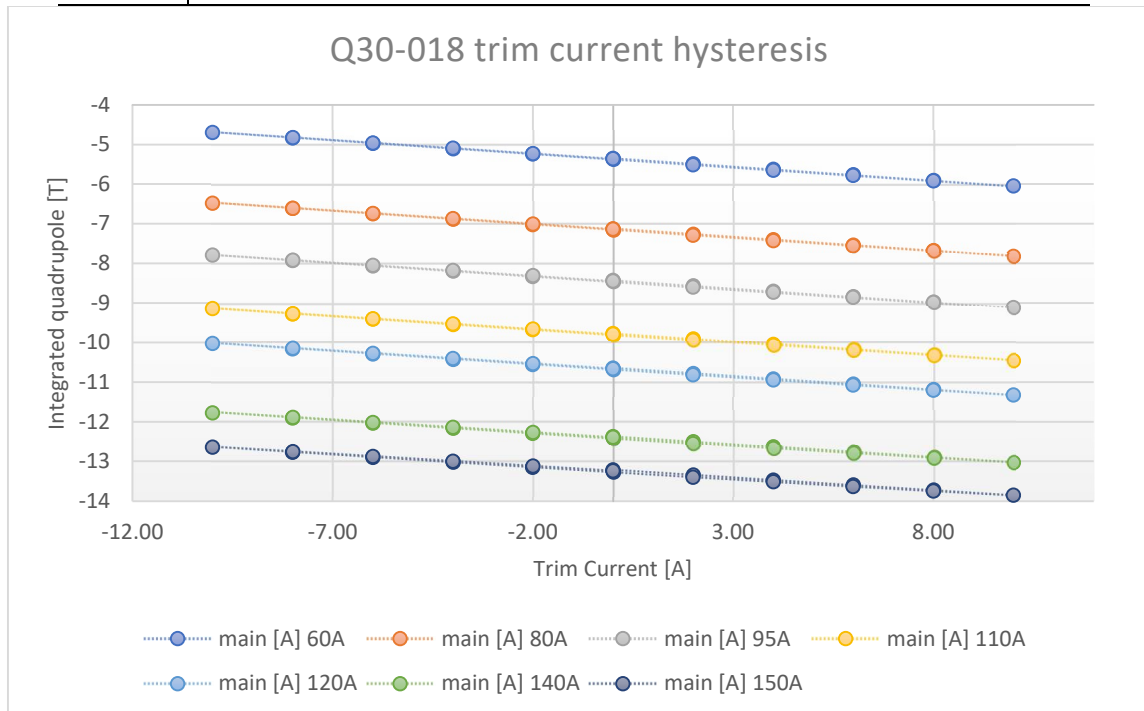
| trim [A] | main [A] | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|
| | 80A | 95A | 110A | 120A | 140A | 150A |
| 0.00 | -4.72562 | -5.60398 | -6.47406 | -7.04919 | -8.176584 | -8.71837 |
| 2.01 | -4.81756 | -5.695 | -6.56417 | -7.13809 | -8.262219 | -8.79986 |
| 4.01 | -4.90964 | -5.78626 | -6.65438 | -7.22735 | -8.348135 | -8.88111 |
| 6.00 | -5.0016 | -5.87743 | -6.74448 | -7.31664 | -8.433536 | -8.96109 |
| 8.01 | -5.09354 | -5.9685 | -6.83439 | -7.40559 | -8.518316 | -9.0396 |
| 10.00 | -5.18491 | -6.0595 | -6.92427 | -7.49436 | -8.602453 | -9.11672 |
| 8.00 | -5.1003 | -5.9761 | -6.8434 | -7.41576 | -8.531953 | -9.05449 |
| 6.00 | -5.01329 | -5.89054 | -6.75991 | -7.33404 | -8.456925 | -8.98732 |
| 4.00 | -4.92553 | -5.80402 | -6.67513 | -7.2508 | -8.379121 | -8.91657 |
| 1.99 | -4.83713 | -5.71669 | -6.5893 | -7.16629 | -8.299233 | -8.84267 |
| 0.01 | -4.74836 | -5.62872 | -6.50272 | -7.08085 | -8.217812 | -8.76611 |
| -2.00 | -4.65932 | -5.54053 | -6.4157 | -6.99493 | -8.135275 | -8.68764 |
| -3.99 | -4.56949 | -5.45156 | -6.32775 | -6.90788 | -8.051171 | -8.60704 |
| -6.00 | -4.47944 | -5.36214 | -6.23936 | -6.82031 | -7.966305 | -8.52508 |
| -8.01 | -4.38848 | -5.27244 | -6.15056 | -6.73231 | -7.88079 | -8.44215 |
| -10.00 | -4.29851 | -5.1823 | -6.06134 | -6.64381 | -7.794542 | -8.35811 |
| -8.00 | -4.38425 | -5.26694 | -6.1441 | -6.72501 | -7.871071 | -8.43068 |
| -6.00 | -4.4714 | -5.35313 | -6.22879 | -6.80833 | -7.950287 | -8.50626 |
| -4.00 | -4.55935 | -5.44002 | -6.31429 | -6.89258 | -8.030643 | -8.58289 |
| -2.00 | -4.64768 | -5.52748 | -6.4003 | -6.97744 | -8.111714 | -8.66009 |
| 0.00 | -4.7359 | -5.61492 | -6.48639 | -7.06236 | -8.192841 | -8.7371 |

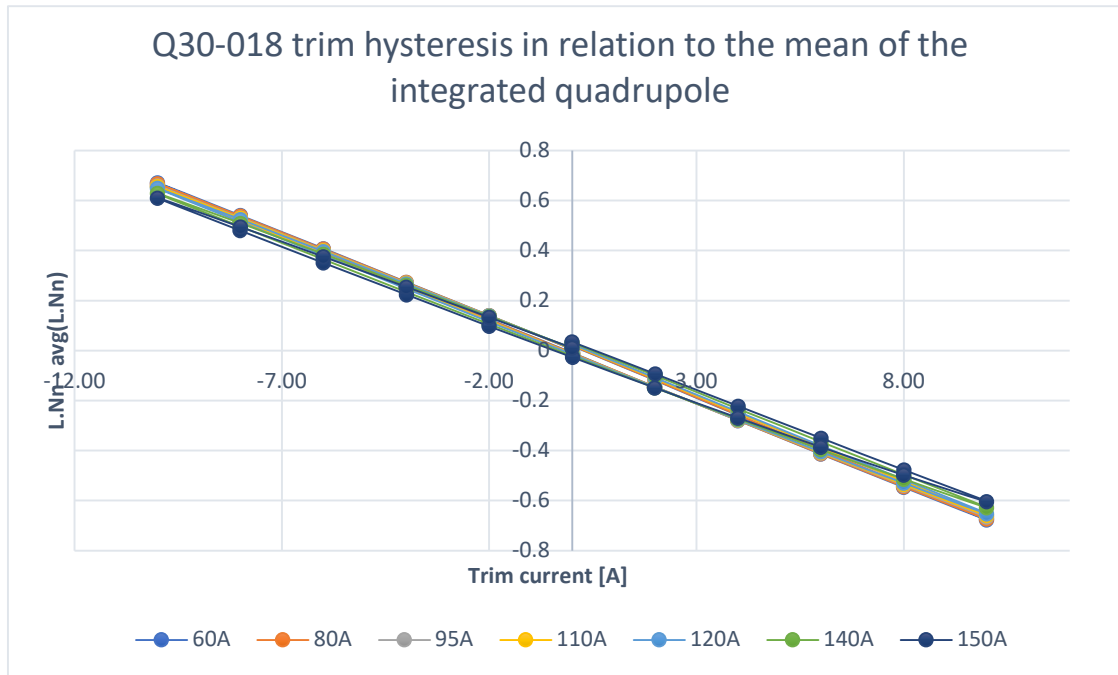


Hysteresis Excitation Measurement – trim coil – Q30-018

Integrated Normal Quadrupole [T]

| trim [A] | main [A] | | | | | | |
|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 60A | 80A | 95A | 110A | 120A | 140A | 150A |
| 0.00 | -5.34762 | -7.12601 | -8.42583 | -9.77224 | -10.6452 | -12.37 | -13.2128 |
| 2.01 | -5.486313 | -7.26428 | -8.56333 | -9.9082 | -10.78 | -12.5012 | -13.3403 |
| 4.01 | -5.625813 | -7.40328 | -8.70158 | -10.0452 | -10.9162 | -12.6339 | -13.4693 |
| 6.00 | -5.765294 | -7.54207 | -8.83976 | -10.1819 | -11.0519 | -12.7661 | -13.5975 |
| 8.01 | -5.904578 | -7.68087 | -8.97789 | -10.3186 | -11.1875 | -12.8977 | -13.7246 |
| 10.00 | -6.044002 | -7.81964 | -9.11598 | -10.4551 | -11.323 | -13.0289 | -13.8507 |
| 8.00 | -5.913117 | -7.69018 | -8.98963 | -10.3305 | -11.201 | -12.9154 | -13.7452 |
| 6.00 | -5.780048 | -7.55823 | -8.86009 | -10.2025 | -11.0751 | -12.7965 | -13.6329 |
| 4.00 | -5.64602 | -7.42522 | -8.72915 | -10.0728 | -10.9471 | -12.6743 | -13.5164 |
| 1.99 | -5.511367 | -7.29133 | -8.59717 | -9.94178 | -10.8176 | -12.5497 | -13.3966 |
| 0.01 | -5.376211 | -7.15687 | -8.46444 | -9.80985 | -10.6869 | -12.4232 | -13.2742 |
| -2.00 | -5.24074 | -7.02192 | -8.33107 | -9.67716 | -10.5554 | -12.2953 | -13.1497 |
| -3.99 | -5.105599 | -6.88722 | -8.19782 | -9.54445 | -10.4237 | -12.1666 | -13.0239 |
| -6.00 | -4.969026 | -6.75102 | -8.06307 | -9.41007 | -10.2902 | -12.036 | -12.896 |
| -8.01 | -4.832248 | -6.61468 | -7.92801 | -9.27537 | -10.1564 | -11.9047 | -12.7671 |
| -10.00 | -4.69514 | -6.47805 | -7.79245 | -9.13999 | -10.0218 | -11.7726 | -12.637 |
| -8.00 | -4.82615 | -6.6081 | -7.92002 | -9.26663 | -10.1467 | -11.8923 | -12.7526 |
| -6.00 | -4.958966 | -6.74014 | -8.04985 | -9.39599 | -10.2744 | -12.0153 | -12.8719 |
| -4.00 | -5.092925 | -6.87337 | -8.18094 | -9.52647 | -10.4035 | -12.1402 | -12.9931 |
| -2.00 | -5.226339 | -7.00619 | -8.3117 | -9.65664 | -10.5323 | -12.2649 | -13.1141 |
| 0.00 | -5.361206 | -7.14026 | -8.44396 | -9.7882 | -10.6626 | -12.3911 | -13.2365 |





Hysteresis Excitation Measurement – trim coil – Q30-028

Integrated Normal Quadrupole [T]

| trim [A] | main [A] | | | | | | |
|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 60A | 80A | 95A | 110A | 120A | 140A | 150A |
| 0.00 | -5.340643 | -7.12002 | -8.44788 | -9.76466 | -10.6355 | -12.3522 | -13.1878 |
| 2.01 | -5.479422 | -7.25824 | -8.58485 | -9.90003 | -10.7696 | -12.4821 | -13.3136 |
| 4.01 | -5.618924 | -7.39715 | -8.72265 | -10.0364 | -10.905 | -12.6137 | -13.441 |
| 6.00 | -5.758517 | -7.53591 | -8.8604 | -10.1728 | -11.0402 | -12.7448 | -13.5675 |
| 8.01 | -5.897954 | -7.67463 | -8.99796 | -10.309 | -11.1751 | -12.8753 | -13.6928 |
| 10.00 | -6.037432 | -7.81335 | -9.13541 | -10.445 | -11.31 | -13.0052 | -13.817 |
| 8.00 | -5.906733 | -7.68439 | -9.0088 | -10.3217 | -11.1895 | -12.8939 | -13.7143 |
| 6.00 | -5.773893 | -7.5528 | -8.87912 | -10.1946 | -11.0647 | -12.7767 | -13.6044 |
| 4.00 | -5.640031 | -7.42005 | -8.74793 | -10.0656 | -10.9377 | -12.6561 | -13.4901 |
| 1.99 | -5.505466 | -7.28645 | -8.61573 | -9.93533 | -10.8091 | -12.5329 | -13.3722 |
| 0.01 | -5.370357 | -7.15216 | -8.48258 | -9.80393 | -10.6792 | -12.4077 | -13.2516 |
| -2.00 | -5.234893 | -7.01744 | -8.34893 | -9.67183 | -10.5483 | -12.2809 | -13.1287 |
| -3.99 | -5.099831 | -6.88298 | -8.21548 | -9.53964 | -10.4173 | -12.1535 | -13.0046 |
| -6.00 | -4.963282 | -6.74692 | -8.08033 | -9.40577 | -10.2845 | -12.024 | -12.8782 |
| -8.01 | -4.826512 | -6.61069 | -7.94488 | -9.27146 | -10.1511 | -11.8938 | -12.7506 |
| -10.00 | -4.689323 | -6.47392 | -7.80885 | -9.13646 | -10.0171 | -11.7623 | -12.6217 |
| -8.00 | -4.820017 | -6.6037 | -7.93696 | -9.26224 | -10.1409 | -11.8803 | -12.7351 |
| -6.00 | -4.952665 | -6.73557 | -8.06744 | -9.39074 | -10.2676 | -12.002 | -12.8526 |
| -4.00 | -5.086553 | -6.8685 | -8.19919 | -9.52063 | -10.396 | -12.1255 | -12.9721 |
| -2.00 | -5.219911 | -7.00092 | -8.33041 | -9.65011 | -10.5239 | -12.2489 | -13.0916 |
| 0.00 | -5.35471 | -7.13479 | -8.46304 | -9.78104 | -10.6534 | -12.3738 | -13.2122 |

