



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

DESENVOLVIMENTO DE SENSORES PARA MEDIDAS DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS GERADOS PELA CORRENTE DE PLASMA DO EXPERIMENTO TOKAMAK ESFÉRICO

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

(PIBIC/CNPq/INPE)

Andréia Vieira Roussille (Etep Faculdades, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: andrea_roussille@yahoo.com.br

Dr. Edson Del Bosco (LAP/CTE/INPE, Orientador)
E-mail: bosco@plasma.inpe.br

Junho de 2007

SUMÁRIO

	Pg.
RESUMO	01
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	02
CAPÍTULO 2 – BOBINA DE HELMHOLTZ	05
CAPÍTULO 3 – SONDAS MAGNÉTICAS	08
CAPÍTULO 4 – BOBINA DE ROGOWSKI	11
CAPÍTULO 5 – CALIBRAÇÃO DOS SENSORES MAGNÉTICOS	13
5.1 Calibração das sondas magnéticas	13
5.2 Calibração das bobinas de Rogowski	22
CAPÍTULO 6 – INSTALAÇÃO NA CÂMARA DE VÁCUO	24
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	26
7.1 Conclusão	26
7.2 Trabalhos Futuros	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
APÊNDICE A – PROJETO DA BOBINA DE HELMHOLTZ	28
APÊNDICE B – PROJETO DA BOBINADEIRA	30

Resumo

Este trabalho, iniciado em agosto de 2006, teve como objetivo fabricar e calibrar sensores para medição de campos magnéticos gerados pelo corrente de plasma produzido no Experimento Tokamak Esférico (ETE). Inicialmente foi projetada e construída uma bobina de Helmholtz que foi usada para a calibração das sondas magnéticas. Foi, também, projetada e construída uma bobinadeira constituída de um sistema de polias e motor com controle de velocidade para enrolar as sondas magnéticas e as bobinas de Rogowski. Para a medição do campo magnético do ETE, foram fabricadas 26 sondas magnéticas duplas e 5 bobinas de Rogowski. As sondas magnéticas possuem enrolamento em dois sentidos perpendiculares entre si, possibilitando a medida de duas componentes do campo magnético num mesmo ponto. As sondas são pequenas bobinas que quando imersas em um campo magnético que varia no tempo, têm uma tensão induzida pelo mesmo de acordo com a Lei de Faraday. Para gerar um campo variado para a calibração das sondas, foi utilizada a bobina de Helmholtz que produz um campo magnético uniforme conhecido em uma determinada região. Uma das sondas foi escolhida e intitulada sonda de referência, a qual foi calibrada com frequências e tensões variadas. Com este procedimento determinou-se o valor médio das constantes de calibração com os respectivos desvios padrão da sonda de referência, assim como, possibilitou a escolha da melhor faixa de frequência para a calibração das demais sondas. Foram feitas medidas de calibração com uma blindagem que simula a estrutura de sustentação das sondas. Os resultados das calibrações estiveram de acordo com os previstos. Como exemplo para o enrolamento interno da sonda grande $K_{\text{teo}} = 1,81 \times 10^{-2} \text{ Ts/V}$ e $K_{\text{exp}} = 1,80 \times 10^{-2} \text{ Ts/V}$. Para obter a constante de calibração em T/V deve-se utilizar um integrador que no nosso caso possui ganho de 3300 s^{-1} . A Rogowski é uma bobina toroidal composta por espiras em série usada para medir correntes AC. A corrente a ser medida passa por dentro da bobina e induz um campo magnético na mesma. A calibração da Rogowski foi feita passando-se uma corrente conhecida por dentro da bobina e medindo a tensão gerada na mesma. O sistema de sustentação e proteção dos sensores dentro da câmara de vácuo está concluído e o trabalho de montagem dos sensores no interior da câmara foi iniciado.

1. Introdução

Este trabalho, iniciado em agosto de 2006, teve como objetivo fabricar e calibrar sensores para medição de campos magnéticos gerados pelo corrente de plasma produzido no Experimento Tokamak Esférico (ETE).

O plasma, também conhecido como o quarto estágio da matéria, é um gás ionizado que se forma quando um gás é superaquecido e os elétrons se rompem, deixando partículas eletricamente carregadas ^[1]. No seu conjunto, o plasma é neutro, já que contém uma quantidade igual de partículas carregadas positiva e negativamente, a interação destas cargas dá ao plasma uma variedade de propriedades diferentes das dos gases. Aproximadamente 99% do universo visível é constituído de plasma ^[2], mas a ocorrência do mesmo próximo a Terra é bem limitada, próximos a ela o plasma pode ser encontrado em lugares como o sol, ionosfera e raios em tempestades que caem sobre a Terra.

O plasma tem diversas aplicações de grande importância nas indústrias eletrônica, aeroespacial, metalúrgica, biomédica, e de tratamento de resíduos e detritos. Algumas tecnologias comuns hoje em dia só são viáveis pela utilização do plasma. A aplicação mais promissora do plasma é a utilização do mesmo na fusão termonuclear controlada para obtenção de energia limpa e praticamente inesgotável ^[3].

Atualmente há um grande desequilíbrio no uso das reservas de energia entre países altamente industrializados e países em desenvolvimento. A situação mostra-se ainda pior em países subdesenvolvidos e a demanda por energia no futuro só tende a aumentar. A procura por fontes alternativas de energia está cada vez mais intensiva e a fusão termonuclear está entre as três únicas formas de fonte de energia primária disponíveis junto com a energia solar e a fissão nuclear.

O objetivo dos estudos com fusão é desenvolver centrais elétricas para gerar eletricidade de uma maneira eficiente. Atualmente, as condições alcançadas em laboratório estão próximas das condições de ignição necessárias para um reator à fusão. Entretanto, os estudos prosseguem para resolver os complexos problemas que envolvem o plasma de fusão. O Tokamak é o engenho mais promissor, até o momento, para a obtenção da fusão termonuclear.

A palavra Tokamak é uma abreviação russa para “Câmara Magnética Toroidal”. O Tokamak é constituído de uma câmara de vácuo toroidal - onde é formado o plasma - e um conjunto de bobinas regularmente espaçadas em torno da câmara toroidal. Esse conjunto de bobinas gera um campo magnético intenso na direção toroidal, enquanto que uma corrente no plasma cria um campo magnético mais fraco na direção poloidal. O campo magnético resultante tem linhas de força helicoidais semelhantes a uma mola que se fecha sobre si própria, o efeito deste campo faz com que o plasma fique confinado dentro da câmara. O confinamento é essencial para evitar que o plasma tenha contato com as paredes da câmara, isso faria com que metais pesados fossem liberados da mesma e evita também o contato com os componentes que se localizam dentro da câmara (como as sondas magnéticas) e não são resistentes as altas temperaturas do plasma. A *figura 1-1* mostra um esquema geral de um Tokamak.

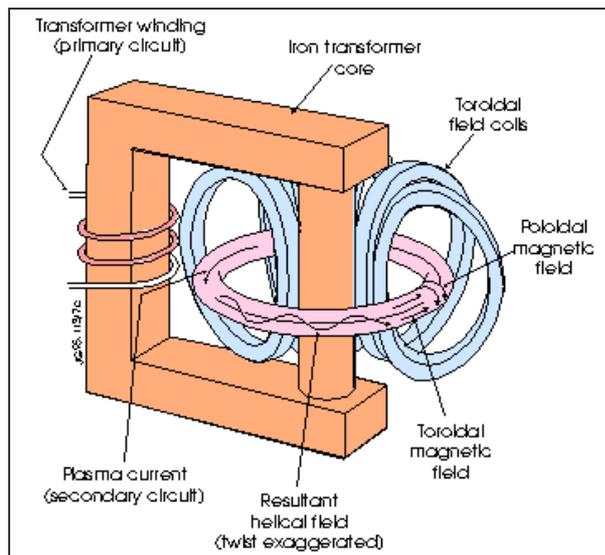


Figura 1-1. Esquema de um Tokamak.

O Laboratório Associado de Plasma (LAP) possui em operação um Tokamak denominado ETE (Experimento Tokamak Esférico) ^[4]. O ETE é uma máquina dedicada ao estudo de plasma em tokamaks de baixa razão de aspecto, tem como objetivos:

- Desenvolver diagnósticos de plasma (instrumentos para medidas em plasmas) apropriados para tokamaks esféricos.
- Treinar pessoal na operação de tokamaks (O ETE está aberto para colaboração com outros laboratórios e universidades).
- Explorar novas idéias no que diz respeito à geração de corrente durante a fase de iniciação do plasma e operação em estado estacionário.
- Realizar estudos para melhorar o confinamento do plasma (dependendo da implementação de métodos de aquecimento auxiliar).
- Estudar o domínio dos parâmetros de operação dos tokamaks esféricos (regime ôhmico, valor mínimo da corrente nas bobinas do campo toroidal em relação à corrente de plasma, estabilidade do plasma).
- Estudar fenômenos do plasma da borda por meio de diagnósticos apropriados (reciclagem de partículas, impurezas, excitação de campo elétrico radial).

A figura 1-2 mostra o esquema geral do Tokamak ETE (Experimento Tokamak Esférico) do LAP/INPE.

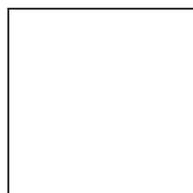


Figura 1-2. Esquema do Tokamak ETE.

Os principais parâmetros principais do ETE são mostrados na tabela abaixo:

Parâmetro	Valor	Unidade
Raio maior	0,3	Metros
Razão menor	0,2	Metros

Indução magnética toroidal	0,4	Tesla
Corrente de plasma	$(0,2 - 0,4) \times 10^6$	Ampère

A *figura 1-3* mostra uma foto recente do tokamak ETE.

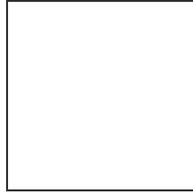


Figura 1-3 Tokamak ETE do Laboratório Associado de Plasma.

No capítulo 2, é apresentada a bobina de Helmholtz, que foi usada para a calibração das sondas magnéticas, cuja descrição é encontrada no capítulo 3. O capítulo 4 trata das bobinas de Rogowski. O processo de calibração dos sensores é descrito no capítulo 5 e o processo de instalação dos sensores na câmara no capítulo 6. No capítulo 7 encontra-se a conclusão e descrição de trabalhos futuros.

2. Bobina de Helmholtz

Consiste de duas bobinas circulares, planas e de mesmo eixo, cada uma contendo N espiras com correntes fluindo no mesmo sentido. A separação entre estas bobinas é igual ao raio R comum a ambas. A corrente elétrica de alimentação das bobinas pode ser contínua (CC) ou alternada (CA). A bobina de Helmholtz tem várias aplicações, tais como: determinação das componentes vertical e horizontal do campo magnético terrestre, estudo dos efeitos de campos magnéticos em componentes ou equipamentos eletrônicos, estudo de efeitos biomagnéticos, entre outras. Nesse trabalho ela será utilizada para a calibração de sondas para a determinação de campos magnéticos no tokamak ETE. A *figura 2-1* mostra o esquema da bobina de Helmholtz.

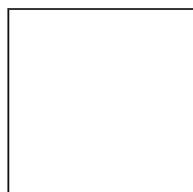


Figura 2-1. Esquema da geometria de uma bobina de Helmholtz. Onde “2b” é o diâmetro da bobina e “a” o raio.

A corrente das duas bobinas deve estar no mesmo sentido para formar um campo magnético uniforme na região central entre elas, como mostra a figura 2-2.

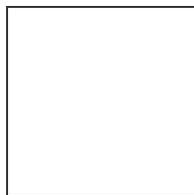


Figura 2-2. Campo magnético uniforme no centro da bobina de Helmholtz..

A bitola do fio a ser utilizado deve ser tal que permita operar a bobina em regime permanente sem que o aquecimento, por efeito Joule, danifique o esmalte isolante. O material usado na estrutura não deve ser condutor para não influenciar no campo.

A bobina projetada para a calibração das sondas magnéticas do ETE tem as seguintes características mostradas na tabela abaixo:

Parâmetro	Valor	Unidade
2b	500	mm
a	250	mm
N	99	Espiras por bobina*
Diâmetro do fio	1,92	mm

* Distribuídas em 11 camadas de 9 voltas cada uma.

Para se certificar que o sistema ficará firme e manter a distância correta entre as duas bobinas, foram utilizados quatro separadores. Para suportar as sondas a serem calibradas utilizou-se uma plataforma móvel entre as duas bobinas onde o campo é constante (região central). As bobinas são sustentadas sobre uma base, que também comportará o gerador de corrente, essa base tem medida 600x400x12,7(mm). Todo o sistema é feito de PVC.

A figura 2-3 e a figura 2-4 mostram fotos da bobina de Helmholtz pronta. Alguns dos desenhos do projeto da bobina são encontrados no apêndice A.

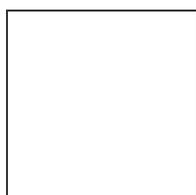


Figura 2-3. Foto lateral da bobina de Helmholtz.

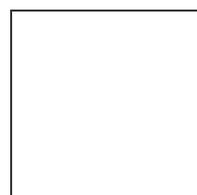


Figura 2-4. Foto frontal da bobina de Helmholtz.

A bobina construída possui uma impedância alta devido ao seu tamanho e grande número de espiras. Por causa dessa impedância, é necessário utilizar uma fonte que gere uma tensão alta

na bobina que faça com que a mesma seja capaz de produzir o campo magnético necessário para a calibração das sondas. Atualmente, o ETE não possui uma fonte com potência suficiente para isso, por tanto, para esta calibração será utilizada uma bobina de Helmholtz menor (*Figura 2-5 e 2-6*), que é apropriada aos parâmetros da fonte que será utilizada.

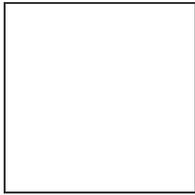


Figura 2-5. Foto frontal da Bobina de Helmholtz utilizada na calibração.

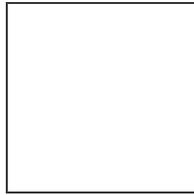


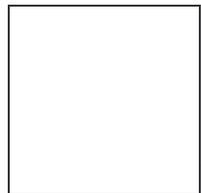
Figura 2-6. Foto lateral da Bobina de Helmholtz utilizada na calibração.

As características dessa bobina de Helmholtz são:

Parâmetro	Valor	Unidade
2b	300	mm
a	150	Mm
N	25	Espiras por bobina*
Diâmetro do fio	1,92	mm

- Distribuídas em 5 camadas de 5 voltas cada uma.

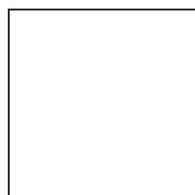
O campo magnético na região central de uma bobina de Helmholtz é dado pela equação 1.1^[4].



Equação (1.1)

onde o campo magnético B é dado em Tesla, o raio a em metros e a corrente I em Ampère.

Substituindo os valores do raio a e do número de espiras N das bobinas, tem-se que o campo magnético na região central da bobina de Helmholtz é dado por:



Equação (1.2)

A equação 1.2 é utilizada na calibração das sondas magnéticas conhecendo-se o valor da corrente elétrica I .

3. Sondas Magnéticas

As sondas magnéticas são pequenas bobinas comumente utilizadas para medição de campos magnéticos em experimentos relacionados a plasma. Há uma grande preocupação com precisão dessas medições e com a possibilidade das sondas afetarem o campo a ser medido, mas até então, elas são a melhor e mais utilizada forma de se determinar o campo magnético formado pelo plasma ^[6].

Quando imersas em um campo magnético variado, as sondas têm uma tensão induzida pelo mesmo de acordo com a Lei de Faraday. A lei diz que a tensão gerada em um condutor é proporcional à variação do campo magnético em que o mesmo se encontra submerso ^[6].

$$(3.1) \quad \square, \quad \text{Equação}$$

onde a tensão V é dada em Volts e a área A em metros.

Dessa forma, a tensão gerada em uma bobina - *equação (3.1)* - depende não só da variação do campo mas também de sua área e número de espiras.

Para a medição do campo magnético gerado pelo plasma do ETE foram projetadas sondas de dois tamanhos, como pode ser observado na *figura 3-1*.

As medidas das sondas são:

Sonda Grande: 25x20x15 (mm)

Sonda Pequena: 20x10x5 (mm)

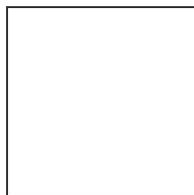


Figura 3-1. Sondas magnéticas, pequena e grande, respectivamente.

As sondas menores ficarão no eixo central da câmara de vácuo, onde o espaço é limitado, por isso o tamanho reduzido.

Para enrolar o fio de cobre nas sondas magnéticas e bobinas de Rogowski foi projetada uma bobinadeira, constituída de um sistema de cinco polias arranjadas entre si e motor com controle de velocidade.

As polias são fixadas em eixos, estes passam por um rolamento sustentado por bases. O primeiro sistema de polias possui um eixo grande que está ligado ao motor, esse sistema gira o segundo sistema de polias através de um o-ring. Uma dessas polias possui dois sulcos e esse segundo sulco permite a ligação à terceira polia através de outro o-ring, assim o sistema todo gira na mesma velocidade constante gerada pelo motor.

Junto com o sistema de polias existe um transformador que reduz a tensão de 110V para 18V, essa tensão alimenta o circuito que controla a velocidade do motor. Foi adaptado um pedal ao sistema para que o operador possa ativar e desativar o sistema sem ter que ocupar suas mãos. A *figura 3-2* mostra uma foto da bobinadeira.

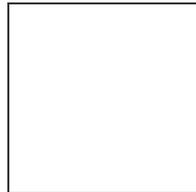


Figura 3-2. Bobinadeira

O segundo sistema de polias foi usado para o enrolamento das bobinas de Rogowski. Nas duas bases estão anexados, através de hastes, dois carretéis. Do lado esquerdo fica o fio de teflon que passa por dentro do eixo, é enrolado pelo operador e passa para o outro eixo para ser guardado, já enrolado por um fio de cobre, no carretel do lado direito.

O terceiro sistema é para o enrolamento das sondas magnéticas. A sonda é presa por um fixador e guiada pelo outro eixo.

A *figura 3-3* mostra uma sonda grande com o enrolamento interno pronto e o externo ainda em processo e a *figura 3-4* mostra a confecção de uma bobina de Rogowski.

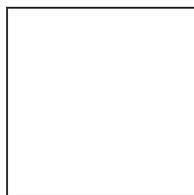


Figura 3-4. Confecção de uma sonda magnética.

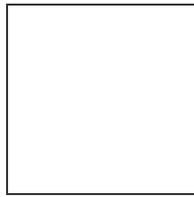


Figura 3-5. Fabricação de uma bobina de Rogowski.

Foram fabricadas e enroladas 18 sondas grandes e 11 sondas pequenas. O corpo das sondas é confeccionado de cerâmica usinável e enrolado com fio de cobre especial 200°C, AWG 27 (0,37mm). As sondas possuem duas camadas de fio e com dois enrolamentos – interno e externo – perpendiculares entre si, o que permite que o campo seja medido em dois sentidos diferentes.

4. Bobina de Rogowski

É uma bobina toroidal - composta por espiras em série - usada para medir correntes AC. Apresenta uma baixa indutância, o que a torna uma excelente bobina para medir altas correntes e pulsos rápidos de frequência. O condutor cuja corrente será medida passa por dentro da bobina e induz um campo magnético na mesma como se pode observar na *figura 4-1*.

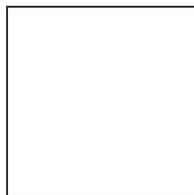
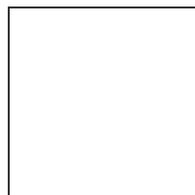


Figura 4-1. Princípio de funcionamento de uma bobina de Rogowski.

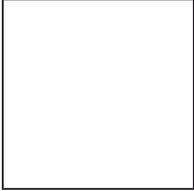
A bobina gera uma voltagem proporcional ao campo induzido de acordo com a *equação (4.1)*, onde a tensão V é dada em Volts e a área A em metros.



(4.1)

Equação

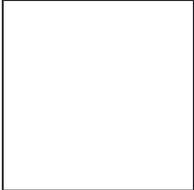
O campo magnético gerado pode ser determinado pela *equação (4.2)*, onde C é o comprimento da bobina.



(4.2)

Equação

Substituindo a *equação (4.2)* na *equação (4.1)* temos a *equação (4.3)* que determina a voltagem gerada na bobina de Rogowski e dessa forma podemos calcular a corrente que passa pelo condutor ^[7].



Equação (4.3)

Para o ETE foram fabricadas 5 bobinas de Rogowski, todas foram enroladas com fio AWG 24 (0,565mm), sendo uma de 2,82m, duas de 80cm e duas de 50cm. As *figuras 4-2 e 4-3* mostram uma das bobinas de Rogowski fabricadas para o ETE.

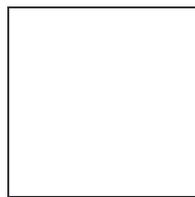


Figura 4-2. Parte de uma bobina de Rogowski

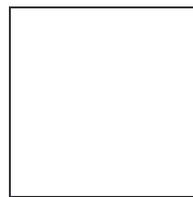


Figura 4-3. Detalhe do enrolamento

A Rogowski de 2,82m é a única que contorna a câmara inteira. As outras Rogowski menores são chamadas de Rogowski parciais. Estas, quando ligadas entre si se comportam como uma Rogowski completa e sozinhas funcionam como sondas magnéticas e são usadas para determinar a posição do plasma dentro da câmara de vácuo.

A *figura 4-4* mostra uma bobina de Rogowski que foi fabricada para ficar fora da câmara de vácuo, medindo a corrente da bobina toroidal. Esta bobina também foi enrolada com fio AWG 24 e tem raio $r = 5\text{cm}$.

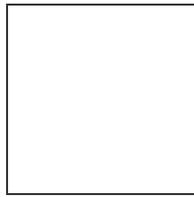


Figura 4-4. Bobina de Rogowski para a medição da corrente da bobina toroidal do Tokamak.

5. Calibração dos Sensores Magnéticos

5.1 Calibração das sondas magnéticas

Antes de serem instaladas no Tokamak, as sondas precisam passar por um processo de calibração. Isso é feito para ter certeza de que as mesmas estão medindo os sinais corretamente e para analisar as características de cada uma das sondas.

Para isso, foi usada a bobina de Helmholtz, cujo campo já foi calculado na *Equação (1.2)*. A bobina de Helmholtz foi ligada a um circuito AC com uma frequência previamente escolhida e uma resistência, como se pode ver na *Figura 5-1*. A resistência foi fabricada de modo a apresentar baixa indutância.

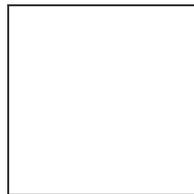
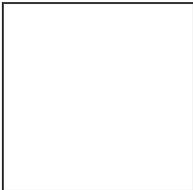


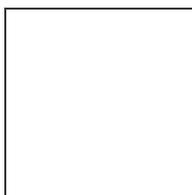
Figura 5-1. Esquema do circuito usado na calibração. Amarelo: tensão na resistência; Verde: Tensão na sonda.

A sonda é colocada no centro da bobina de Helmholtz, onde o campo magnético oscilante induz uma tensão na mesma. O valor dessa tensão é medido por um osciloscópio e ao mesmo tempo é medida a tensão sobre a resistência do circuito para calcular a corrente.

A tensão medida pela sonda pode ser determinada pela *equação (5.1.1)*.

$$(5.1.1) \quad \text{Equação}$$

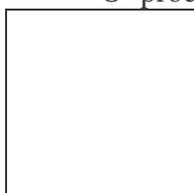
Sendo  e considerando o número de voltas, N , tem-se a *equação (5.1.2)*.



(5.1.2)

Equação

O produto NA é uma constante da sonda, e será chamada de K_S . Sabendo-se que

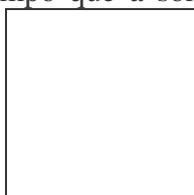


, substituindo na *equação (5.1.2)* tem-se a *equação (5.1.3)*.



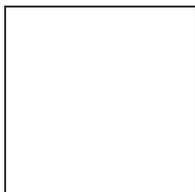
Equação (5.1.3)

O campo que a sonda mediu na calibração é o da bobina de Helmholtz, portanto, foi

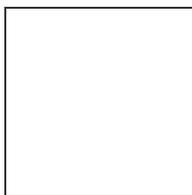


chamado de

, este depende da constante da bobina - calculada na *equação (1.2)* -



logo podemos afirmar que
(5.1.4).



(5.1.4)

Equação

Substituindo e , chegamos na *equação (5.5)*.

$$\text{[Empty Box]}$$

Equação (5.1.5)

Através da *Equação (5.1.5)* determina-se a constante de cada sonda.

$$\text{[Empty Box]}$$

A tabela abaixo mostra a constante teórica das sondas, baseada na área efetiva e no número de voltas estimado.

Área efetiva (m²)	Número de voltas	K_S Teórico (voltas-m²)
$A_{GE} = 226 \times 10^{-6}$	$N_{GE} = 64$	$K_{SGE} = 1,45 \times 10^{-2}$
$A_{GI} = 335,2 \times 10^{-6}$	$N_{GI} = 54$	$K_{SGI} = 1,81 \times 10^{-2}$
$A_{PE} = 181,3 \times 10^{-6}$	$N_{PE} = 16$	$K_{SPE} = 2,9 \times 10^{-3}$
$A_{PI} = 25,2 \times 10^{-6}$	$N_{PI} = 75$	$K_{SPI} = 1,89 \times 10^{-3}$

Duas sondas (uma sonda grande e uma pequena) foram escolhidas para serem as sondas de referência - sonda grande SG18 e sonda pequena SP11. As calibrações das demais sondas serão feitas em relação às sondas de referência. Estas foram usadas em medidas de frequência, através destas foi possível determinar a faixa de frequência em que as sondas respondiam bem e escolher uma frequência para a calibração. As *figuras 5-2 e 5-3* mostram as respostas das sondas grandes (enrolamento externo e interno) em função da frequência e as *figuras 5-4 e 5-5* das sondas pequenas.

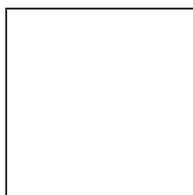


Figura 5-2. Comportamento do enrolamento externo das sondas grandes em relação à frequência.

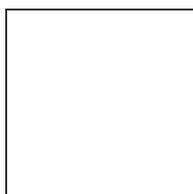


Figura 5-3. Comportamento do enrolamento interno das sondas grandes em relação à frequência.



Figura 5-4. Comportamento do enrolamento externo das sondas pequenas em relação à frequência.

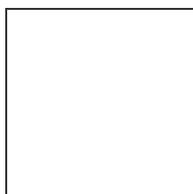


Figura 5-5. Comportamento do enrolamento interno das sondas pequenas em relação à frequência.

Através dessas medidas e outras com frequências fixas e tensões variadas foram escolhidas as frequências de calibração das sondas grandes (3KHz) e das pequenas (6KHz). A resistência usada no circuito de ambas as calibrações foi de $0,73\Omega$.

A tabela abaixo mostra as constantes teóricas das sondas e as constantes obtidas através das medidas feitas.

K_S Teórico	K_S Experimental (Ts/V)
$K_{SGE} = 1,45 \times 10^{-2}$	$K_{SGE} = 1,52 \times 10^{-2}$
$K_{SGI} = 1,81 \times 10^{-2}$	$K_{SGI} = 1,80 \times 10^{-2}$
$K_{SPE} = 2,9 \times 10^{-3}$	$K_{SPE} = 2,7 \times 10^{-3}$
$K_{SPI} = 1,89 \times 10^{-3}$	$K_{SPI} = 2,05 \times 10^{-3}$

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram os resultados finais das calibrações das sondas grandes e pequenas e as razões entre as constantes de cada sonda em relação à sonda de referência.

Tabela 5.1 – Calibração das sondas grandes. Enrolamento externo (GE) e interno (GI).

Sonda		L (μH)	R (Ω)	Ks (Ts/V)	Razão
18	RGE	56,05	2,7	1,52E-02	1,006
	RGI	56,03	2,7	1,80E-02	0,996
1	GE	54,56	2,6	1,49E-02	0,988
	GI	56,47	2,7	1,81E-02	1,000
2	GE	54,81	2,6	1,48E-02	0,982
	GI	54,56	2,6	1,73E-02	0,956
3	GE	55,04	2,6	1,50E-02	0,994
	GI	55,11	2,6	1,77E-02	0,976
4	GE	55,78	2,7	1,51E-02	1,002
	GI	58,61	2,8	1,85E-02	1,023
5	GE	58,04	2,8	1,53E-02	1,016
	GI	55,66	2,7	1,76E-02	0,974
6	GE	55,77	2,6	1,51E-02	1,002
	GI	57,58	2,7	1,82E-02	1,007
7	GE	53,74	2,59	1,47E-02	0,974
	GI	54,98	2,6	1,77E-01	9,758
8	GE	55,2	2,6	1,50E-02	0,994
	GI	54,69	2,6	1,77E-01	9,777
9	GE	54,9	2,6	1,50E-02	0,996
	GI	55,57	2,6	1,78E-02	0,983
10	GE	54,57	2,6	1,48E-02	0,982
	GI	56,08	2,7	1,81E-02	0,999
11	GE	56,2	2,67	1,51E-02	0,998
	GI	56,57	2,8	1,80E-02	0,993
12	GE	54,06	2,66	1,45E-02	0,962
	GI	56,79	2,75	1,82E-02	1,006
13	GE	54,33	2,6	1,47E-02	0,975
	GI	57,38	2,7	1,79E-02	0,991
14	GE	55,08	2,7	1,48E-02	0,977
	GI	56,37	2,7	1,83E-02	1,010
15	GE	55,22	2,7	1,48E-02	0,981
	GI	56,97	2,8	1,81E-02	1,002
16	GE	55,55	2,7	1,50E-02	0,990
	GI	58,58	2,7	1,83E-02	1,012
17	GE	55,21	2,6	1,47E-02	0,973
	GI	58,42	2,8	1,85E-02	1,025

Tabela 5.2 – Calibração das sondas pequenas. Enrolamento externo (PE) e interno (PI).

Sonda		L (μH)	R (m Ω)	Ks (Ts/V)	Razão
11	RPE	5,84	3,86	2,70E-03	1,008

	RPI	11,02	7	2,06E-03	1,015
1	PE	6,07	4	2,74E-03	1,023
	PI	11,81	7	2,03E-03	1,000
2	PE	5,81	3,87	2,66E-03	0,993
	PI	11,1	7,15	2,02E-03	0,995
3	PE	5,92	3,93	2,73E-03	1,018
	PI	10,58	6,79	1,99E-03	0,982
4	PE	6,1	4	2,79E-03	1,042
	PI	11,32	7,29	2,07E-03	1,018
5	PE	6,39	4,17	2,92E-03	1,091
	PI	12,73	8,5	2,05E-03	1,009
6	PE	5,68	3,7	2,65E-03	0,988
	PI	10,92	7	2,01E-03	0,990
7	PE	5,6	3,68	2,64E-03	0,985
	PI	11,16	7,2	2,07E-03	1,017
8	PE	5,77	3,81	2,65E-03	0,988
	PI	10,78	6,92	2,00E-03	0,987
9	PE	6,02	4	2,73E-03	1,020
	PI	10,95	7,04	1,98E-03	0,976
10	PE	6,4	4,2	2,85E-03	1,064
	PI	10,79	6,93	1,99E-03	0,981

Também foram feitas medidas de calibração com uma blindagem que simula a estrutura de sustentação das sondas. A estrutura que sustenta as sondas grandes é composta por duas partes: uma chapa de aço-inox de 5cm de espessura onde a sonda é fixada e uma folha fina também de aço-inox que serve como uma capa protetora como se pode ver na *figura 5-6*.

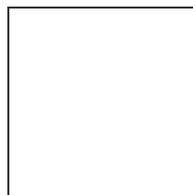


Figura 5-6. Blindagem das sondas grandes. Em cima a sonda sobre a chapa de aço-inox; embaixo a mesma sob a capa protetora.

Através das medidas feitas foi possível constatar que a capa protetora não influencia no sinal recebido pela sonda. Entretanto, a chapa de metal influencia tanto na medida feita pelo enrolamento externo quanto a feita pelo enrolamento interno.

Devido à posição dos enrolamentos em relação ao campo magnético, pode-se observar que o campo medido pelo enrolamento interno sofre maior influência do que o campo medido pelo enrolamento externo. Como se pode observar na *figura 5-7*, o campo magnético B_i que passa pelo enrolamento interno é perpendicular à chapa de metal e por isso é diretamente influenciado pela mesma.

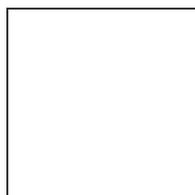


Figura 5-7. Campos magnéticos medidos pelo enrolamento externo e interno da sonda grande.

As figuras 5-8 e 5-9 mostram como a sonda grande se comporta quando está com a blindagem. Pode-se observar que o sinal medido pelo enrolamento externo quase não é afetado, porém o sinal medido pelo enrolamento interno cai bruscamente.

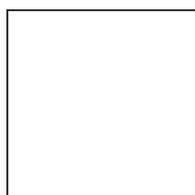


Figura 5-8. Medidas feitas pelo enrolamento externo da sonda grande. Com e sem blindagem.

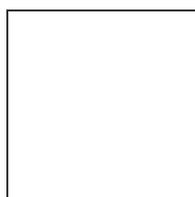


Figura 5-9. Medidas feitas pelo enrolamento interno da sonda grande. Com e sem blindagem.

As sondas pequenas serão fixadas em uma chapa de aço-inox de 1mm de espessura. Ao contrário das sondas grandes, a chapa não interfere na medida feita pelo enrolamento interno, pois o mesmo é paralelo à chapa de aço-inox, como se pode observar na figura 5-10.



Figura 5-10. Campos magnéticos medidos pelo enrolamento externo e interno da sonda pequena.

As figuras 5-11 e 5-12 mostram como a sonda pequena se comporta quando está com a blindagem. Pode-se observar no gráfico 5-7 que o sinal medido pelo enrolamento externo não é afetado para frequências baixas, mas cai consideravelmente para altas frequências.

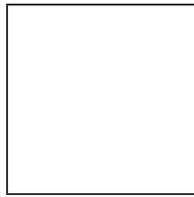


Figura 5-11. Medidas feitas pelo enrolamento externo da sonda pequena. Com e sem blindagem.

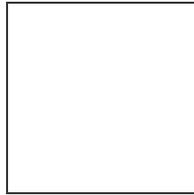


Figura 5-12. Medidas feitas pelo enrolamento interno da sonda pequena. Com e sem blindagem.

As estruturas que sustentam tanto as sondas grandes quanto as pequenas, serão fixadas em uma barra de grafite. Por isso, também foram feitas medidas para ver o efeito da grafite sobre a medida das sondas. A *figura 5-13* mostra que a grafite não interfere em medidas para baixas frequências, mas o sinal cai suavemente para frequências altas.

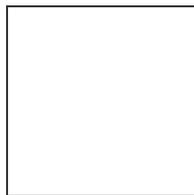


Figura 5-13. Efeito da grafite sobre as sondas.

5.2 Calibração das bobinas de Rogowski

Antes de serem instaladas na câmara de vácuo do Tokamak, as bobinas de Rogowski precisam passar por um processo de calibração. Isso é feito para ter certeza de que as mesmas estão medindo os sinais corretamente.

Para a calibração das bobinas de Rogowski foi montado um circuito composto por um variac e um lock-in. A *figura 5-14* mostra o esquema do circuito elétrico utilizado na calibração.

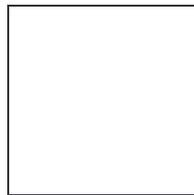


Figura 5-14. Esquema elétrico utilizado na calibração das bobinas de Rogowski.

O variac alimenta, com corrente conhecida, uma bobina que simula a corrente de plasma (B_p). O campo magnético gerado pela corrente da bobina B_p induz um sinal de tensão na bobina de Rogowski. O lock-in amplifier é usado pois o sinal do sensor é muito baixo para ser medido

diretamente por um osciloscópio. O sinal de referência para a frequência do lock-in é obtido através do transformador (110V-9V) ligado no primário do variac.

Para a calibração, as Rogowski parciais foram associadas em série para se comportarem como uma Rogowski completa. A figura 5-6 mostra a Rogowski completa montada no sistema para a calibração.

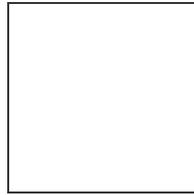
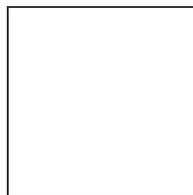
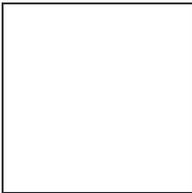
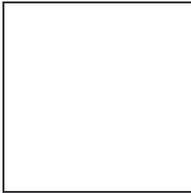
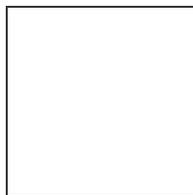


Figura 5-15. Parte do sistema para a calibração das Rogowski. Pode-se observar a Rogowski completa (em azul) simulando sua posição na câmara de vácuo. A bobina teste (em laranja) simula a corrente de plasma. A tensão gerada em uma bobina de Rogowski pode ser determinada pela equação (5.2.1)



Equação (5.2.1)

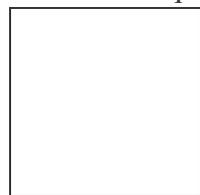
Sendo  e a densidade de voltagens , tem-se a equação (5.2.2)



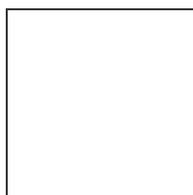
(5.2.2)

Equação

Sabendo-se que $n.A$ são constantes da sonda, temos que a constante teórica da bobina é dada por

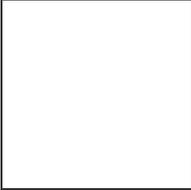


, assim temos a equação (5.2.3) que determina a constante experimental da bobina de Rogowski.



(5.2.3)

Equação

onde a tensão V_b dada em Volts, a corrente I em Ampère e , sendo a frequência f dada em Hertz.

As Rogowski parciais e a Rogowski completa têm a mesma constante teórica pois ambas foram fabricadas com os mesmos parâmetros.

As bobinas internas têm as seguintes características apresentadas na tabela abaixo:

Parâmetro	Valor	Unidade
Densidade de voltas (n)	1770	Voltas por metro
Área Efetiva (A)	$5,1673 \times 10^{-6}$	m^2
K_{teo}	$1,1493 \times 10^{-8}$	Vs/A
K_{exp} (Bobina Completa)	$1,0028 \times 10^{-8}$	Vs/A
K_{exp} (Bobinas Parciais)	$1,0524 \times 10^{-8}$	Vs/A

A bobina que ficará fora da câmara de vácuo para medir a corrente da bobina toroidal tem as seguintes características apresentadas na tabela abaixo:

Parâmetro	Valor	Unidade
Densidade de voltas (n)	1770	Voltas por metro
Área Efetiva (A)	$22,6 \times 10^{-6}$	m^2
K_{teo}	$5,027 \times 10^{-8}$	Vs/A
K_{exp}	$4,744 \times 10^{-8}$	Vs/A

6. Instalação dos Sensores na Câmara de Vácuo

A câmara de vácuo do Experimento Tokamak Esférico já possui sensores instalados em seu interior, por isso o espaço para a instalação dos sensores fabricados é limitado e foi pré-determinado antes dos mesmos serem fabricados. A *figura 6-1* mostra a visão superior da câmara de vácuo e a posição das estruturas onde serão instalados os sensores.



Figura 6-1. Vista superior da câmara de vácuo com a posição das estruturas que sustentam os sensores magnéticos. Em azul a estrutura que sustenta as sondas magnéticas e as Rogowski parciais. Em rosa a posição da Rogowski.

A estrutura que sustenta as sondas magnéticas e as Rogowski parciais é feita de aço-inox e será coberta com a blindagem que foi mostrada na *figura 5-2*. Toda a estrutura é fixada em uma barra de grafite como mostra a *figura 6-2*.

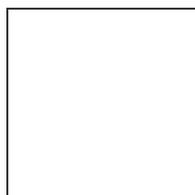


Figura 6-2. Estrutura de sustentação das sondas magnéticas e Rogowski parciais.

A *figura 6-3* mostra a visão frontal dos sensores na câmara de vácuo.

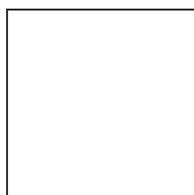


Figura 6-3. Visão frontal dos sensores na câmara de vácuo.

As sondas maiores – em vermelho – serão instaladas contornando a câmara de vácuo, já as menores – em verde – ficarão no eixo central onde o espaço é limitado, por isso o tamanho reduzido. Na mesma estrutura das sondas magnéticas também estão localizadas as Rogowski parciais. A Rogowski completa – em azul – contorna toda a câmara.

A instalação desses sensores na câmara de vácuo não ocorreu devido às dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do sistema de diagnósticos, principalmente relacionadas com a complexidade e quantidade de peças envolvidas.

7. Conclusão e Trabalhos Futuros

7.1 Conclusão

O processo de confecção, calibração e instalação dos sensores para medidas de campos eletromagnéticos gerados pelo Tokamak ETE foi dividido em duas etapas. A primeira etapa, concluída nesse período de bolsa, envolveu um conjunto mínimo de sensores que foram projetados, confeccionados e calibrados.

7.2 Trabalhos Futuros

Na segunda etapa, além da instalação dos sensores da primeira etapa, deverão ser projetados, confeccionados, calibrados e instalados o restante dos sensores. As atividades previstas para a segunda etapa são:

- Participação na equipe de instalação do sistema de sensores da primeira etapa no interior da câmara de vácuo do Tokamak;
- Participação na equipe de medidas iniciais de funcionamento dos sensores da primeira etapa.
- Confecção e calibração e 12 sondas magnéticas duplas;
- Confecção de 8 sondas de fluxo total., que medem o fluxo magnético total produzido pela coluna de plasma no interior de um determinado raio maior da câmara toroidal de vácuo;
- Confecção de 6 sondas de fluxo parcial, que medem o fluxo em uma determinada região;
- Participação na equipe de instalação do sistema de sensores da segunda etapa no interior da câmara de vácuo do Tokamak;
- Participação na equipe de medidas iniciais de funcionamento dos sensores da segunda etapa;

Referências Bibliográficas

[¹] http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Diversidade_de_Plasmas.htm

[²] http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Plasmas_Naturais.htm

[³] http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Tecnologia_de_Plasma.htm

[⁴] Brazilian Journal of Physics, vol. 33, n^o4, December, 2003;
http://www.plasma.inpe.br/LAP_Portal/LAP_Sitio/Texto/Tokamak_Esferico_ETE.htm

[⁵] *Foundations of Electromagnetic Theory*, J. R. Reitz, F. J. Milford, R. W. Christy, 3rd edition, Addison-Wesley Publishing Company;

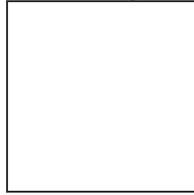
[⁶] *Plasma Diagnostic Techniques*, R. H. Huddlestone and S. L. Leonard, Academic Press, 1965;

[⁷] *Electric and Magnetic Measurements*, P. E. Stott, JET Joint Undertaking.
Construção e Calibração da Bobina de Rogowski, Notas Técnicas do ETE;

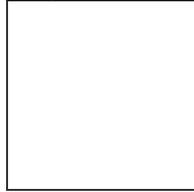
Apêndice A

Projetos da Bobina de Helmholtz construída.

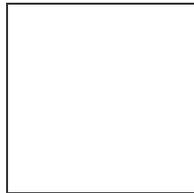
Bobinas Magnéticas



Plataforma Móvel



Base



Apêndice B

Projeto da Bobinadeira

