

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PUBLICAÇÕES

**INSTITUTO DE FÍSICA
CAIXA POSTAL 66318
05315-970 SÃO PAULO - SP
BRASIL**

IFUSP/P-1266

**BOBINAS EXTERNAS PARA DIAGNÓSTICOS
MAGNÉTICOS NO TOKAMAK TCA-BR**

J.H. Vuolo

Instituto de Física, Universidade de São Paulo

Maio/1997

Pág. 1 - 42

Bobinas externas para diagnósticos magnéticos

no Tokamak TCA-BR

J. H. Vuolo

Resumo

Neste relatório são resumidas as principais características e resultados para calibração de diversas bobinas externas para medições magnéticas no Tokamak TCA-BR. Além das bobinas originalmente construídas para este tokamak, são também descritas as bobinas de Rogowski (RB) de uso geral que foram construídas para o Tokamak TBR-1. As bobinas originais do Tokamak TCA-BR são as bobinas de Rogowski para medição da corrente de plasma (RPA e RPB), bobinas tipo cosseno para medição da posição horizontal do plasma (RCA e RCB), bobinas tipo seno para medição da posição vertical do plasma (RSA e RSB), bobinas para medição de fluxos médios vertical, radial e toroidal (RFVA, RFVB, RFRA, RFRB e RFTB), bobina de Rogowski para medição de corrente toroidal (MT) e bobinas para medição de fluxo vertical no eixo do tokamak (VC1, VC2 e VC3). A documentação disponível a respeito dessas bobinas é um projeto preliminar bastante resumido e omisso em muitos detalhes. Algumas características não conferem com as do projeto e não existem dados referentes a uma calibração acurada posterior. Por isso, foi necessário realizar um trabalho de levantamento de características geométricas e de calibração das bobinas. Uma bobina circular de 50 espiras e com raio de 62 cm (SP) foi construída para auxiliar a calibração das bobinas de medição.

Índice

1. Bobinas de Rogowski para medição da corrente	1.
2. Bobinas de simulação do plasma do Tokamak TCA-BR (SP)	7.
3. Bobinas de Rogowski de uso geral (RB)	9.
4. Bobina para medição de corrente toroidal (MT)	12.
5. Bobinas para medição da corrente de plasma (RPA e RPB)	16.
6. Bobinas de posição do plasma (RC e RS)	25.
7. Bobinas de fluxo vertical, radial e toroidal	37.
8. Bobinas de fluxo vertical axial	41.
Referências	42.

1 Bobinas de Rogowski para medição de corrente

1.1 Introdução

Um método usual para medição de corrente intensa é a medição de tensão num resistor (shunt) em série com a corrente a ser medida. Entretanto, esta técnica é bastante inconveniente uma vez que o resistor introduz perturbação no sistema sob medição, dissipa alguma potência, apresenta ruído excessivo e é ligado eletricamente ao sistema sob medição, o que, em geral, traz inconvenientes e problemas de segurança quando existem altas tensões. No caso de correntes elétricas intensas e variáveis no tempo, todos estes inconvenientes são praticamente eliminados utilizando uma bobina de Rogowski¹.

No que segue, são apresentadas algumas considerações de caráter geral sobre as bobinas de Rogowski para medição de corrente e apresentados os resultados para as bobinas a serem utilizadas no Tokamak TCA-BR, para medição de corrente de plasma, corrente toroidal e outras correntes na máquina.

1.2 Sensibilidade de uma bobina de Rogowski

Uma bobina de Rogowski simples é constituída de um enrolamento com N espiras distribuídas uniformemente ao longo de uma curva C , tal como mostrado na Figura 1.

O fluxo através de cada pequena espira de área A é

$$\phi_{esp} \cong \vec{B} \cdot \vec{A}, \quad (1)$$

onde \vec{B} é o campo magnético e \vec{A} tem módulo A e é perpendicular ao plano da espira. Se a bobina de Rogowski é constituída de um grande número de pequenas espiras ao longo de uma curva C , o fluxo total é

$$\phi = \sum \phi_{esp} \cong \int_C \vec{B} \cdot \vec{A} n dl = A \int_C n \vec{B} \cdot d\vec{l}, \quad (2)$$

onde n é o número local de espiras por unidade de comprimento, $d\vec{l}$ é um deslocamento infinitesimal ao longo da curva, que tem a mesma direção de \vec{A} . Para uma distribuição uniforme de espiras, n é constante e

$$\phi \cong n A \int_C \vec{B} \cdot d\vec{l}. \quad (3)$$

Pela Lei de Ampère,

$$\int_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I, \quad (4)$$

onde I é a corrente total enlaçada pela curva C . Assim, resulta que, para as aproximações consideradas, o fluxo total é independente da distribuição de corrente e é dado por

$$\phi \cong \mu_0 n A I. \quad (5)$$

¹Diagnósticos magnéticos são discutidos nas Referências 1 e 2. Uma boa discussão geral sobre bobinas de Rogowski é apresentada na Referência 3.

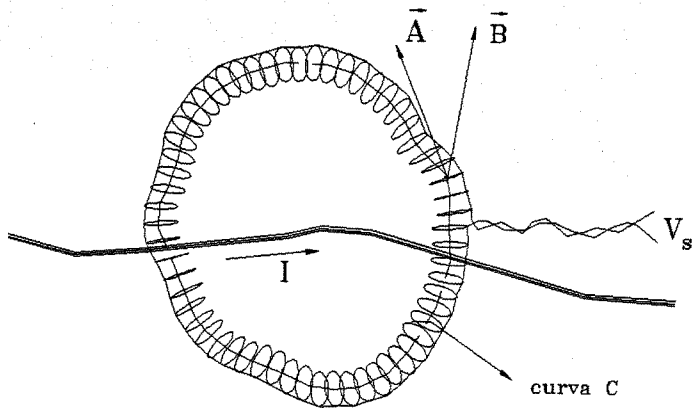


Figura 1: Bobina de Rogowski com N espiras ao longo de uma curva C .

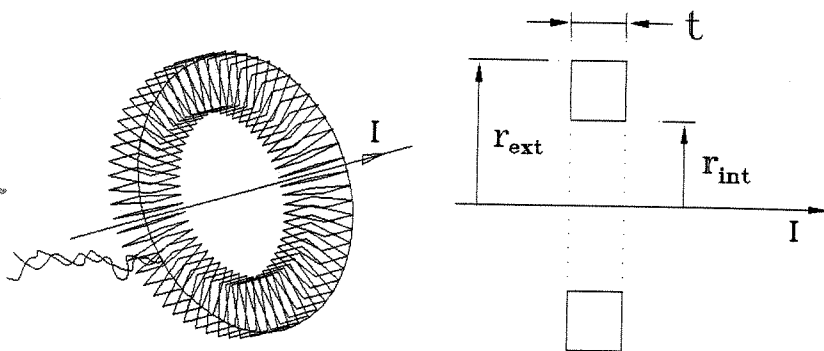


Figura 2: Bobina de Rogowski toroidal com N espiras.

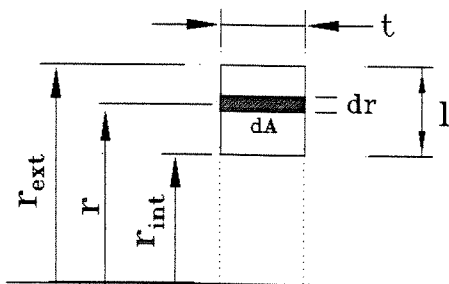


Figura 3: Cálculo do fluxo magnético numa espira.

A tensão induzida na bobina é

$$V_s \cong \mu_o n A \frac{dI}{dt} = K_s \frac{dI}{dt}, \quad (6)$$

onde

$$K_s = \mu_o n A. \quad (7)$$

Se o sinal é integrado por meio de um integrador com ganho real G_i ,

$$V = G_i \int V_s dt \quad (8)$$

e

$$V = G_i K_s I \quad \text{ou} \quad I = \frac{1}{G_i K_s} V, \quad (9)$$

onde é admitido que a corrente elétrica não tem componente constante. É conveniente que a impedância do integrador seja suficientemente alta, para que G_i dependa somente do integrador (ver Seção 1.5).

1.3 Bobina de Rogowski toroidal

No caso de bobina de Rogowski toroidal, tal como a mostrada na Figura 2, a constante K_s pode ser escrita como

$$K_s = \mu_o n A = \frac{\mu_o N A}{2 \pi r_o} \quad (10)$$

onde r_o é um raio médio da bobina, obtido a seguir.

Para um fio retilíneo transportando corrente I e passando pelo eixo do toróide, pode-se obter o fluxo total pela bobina de Rogowski no caso em que a área A não é muito pequena. O fluxo total é obtido integrando-se a indução magnética na área da espira (Figura 3):

$$\phi = N \int_A B(r) dA, \quad \text{onde} \quad B(r) = \frac{\mu_o I}{2 \pi r}. \quad (11)$$

Assim,

$$\phi = N t \frac{\mu_o I}{2 \pi} \int_{r_{\text{int}}}^{r_{\text{ext}}} \frac{dr}{r} = N B_o A, \quad (12)$$

onde

$$A = l s \quad \text{e} \quad B_o = \frac{\mu_o I}{2 \pi r_o} \quad \text{sendo} \quad r_o = \frac{l}{\ln \frac{r_{\text{ext}}}{r_{\text{int}}}}. \quad (13)$$

Em resumo, este valor para r_o a ser usado como "raio médio" do toróide na Equação 10. No caso em que a área A não é muito pequena, esta correção deve ser utilizada.

Neste caso, a autoindutância da bobina é dada por

$$L_s = \frac{\mu_o N^2 t}{2 \pi} \ln \frac{r_{\text{ext}}}{r_{\text{int}}} = \frac{\mu_o N^2 A}{2 \pi r_o}. \quad (14)$$

As expressões acima são úteis para estimativas no caso de bobinas de Rogowski mais complicadas.

4 Calibração de uma bobina de Rogowski.

Para determinar a constante K_s , característica da bobina, o procedimento mais simples consiste em utilizar uma corrente alternada na frequência angular ω :

$$I = I_m \text{sen } \omega t. \quad (15)$$

Este caso,

$$V_s = K_s \omega I_m \cos \omega t. \quad (16)$$

Então, a amplitude máxima da tensão induzida é dada por

$$V_{sm} = K_s \omega I_m. \quad (17)$$

Se a constante K_s é dada por

$$K_s = \frac{1}{\omega} \frac{V_{sm}}{I_m}, \quad (18)$$

então também podem ser usados os valores eficazes de V_s e de I .

O método mais simples consiste em utilizar corrente em 60 Hz da rede elétrica. Os valores de V_s podem ser medidos diretamente e a corrente I pode ser obtida a partir da tensão num resistor calibrado R (shunt) ou num transformador de corrente calibrado. Um multímetro digital permite acurácia razoável da ordem de 1%. O inconveniente de utilizar este sistema é que o ruído elétrico da própria rede não pode ser facilmente distinguido.

A calibração também pode ser realizada utilizando corrente pulsada e um integrador na bobina de Rogowski. Este método introduz uma incerteza adicional devida à incerteza no ganho do integrador. Outra desvantagem é a utilização de osciloscópio, com incerteza maior do que a de um multímetro digital. Entretanto, tem a vantagem de permitir uma comparação direta entre o sinal de corrente e o sinal integrado da bobina de Rogowski.

5 Integração do sinal da bobina de Rogowski.

Figura 4 mostra um modelo simplificado para a bobina de Rogowski e o sistema de medição com um integrador passivo, desprezando a indutância e capacitância dos cabos de ligação.

Se L_s é a indutância e R_s a resistência ôhmica da bobina de Rogowski, o ganho complexo do sistema de medição é dado por

$$\hat{G}_i = \frac{1}{j\omega C(R + R_s) - \omega^2 L_s C + 1}. \quad (19)$$

Para bom funcionamento do integrador, $(\omega^2 L_s C + 1)$ deve ser desprezível comparado com $j\omega C(R + R_s)$. Para frequências não muito altas (até alguns kHz) e indutâncias não muito altas (até alguns mH), esta condição é facilmente satisfeita para valores usuais de R , R_s e C .

No caso do chamado "transformador de corrente", as indutâncias são extremamente altas, não havendo necessidade de integrador externo. A integração do sinal é feita pela própria indutância da bobina.

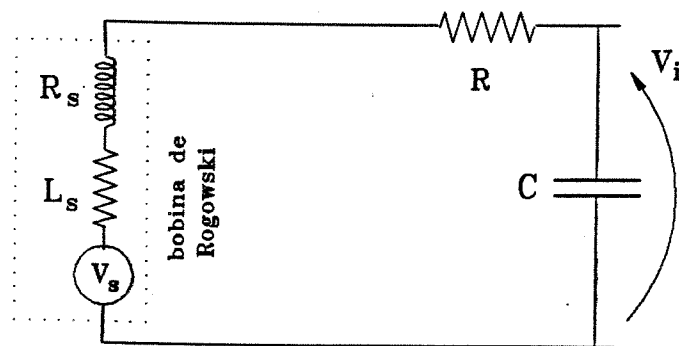


Figura 4: Modelo elétrico para bobina de Rogowski e sistema de medição.

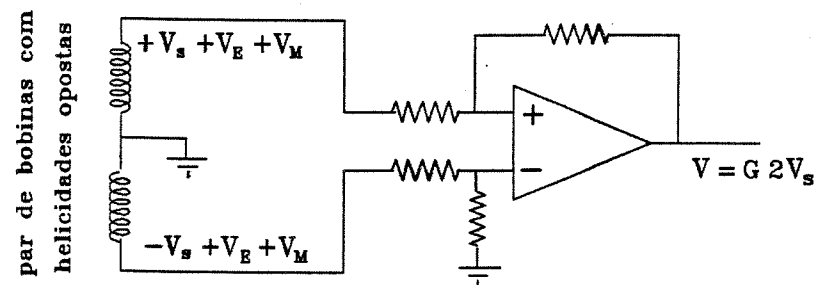


Figura 5: Eliminação de ruído eletrostático com par de bobinas.

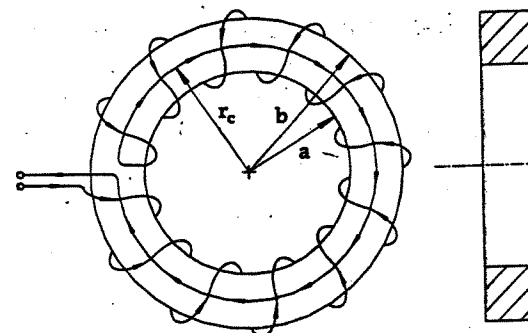


Figura 6: Bobina de Rogowski simples com fio de retorno.

Assim, resultam

$$\hat{G}_i = \frac{1}{j\omega C(R + R_s)} \quad \text{e} \quad G_i = \frac{1}{\omega C(R + R_s)} \quad (20)$$

inconveniente é que este ganho depende da resistência ôhmica da bobina de Rogowski. Em geral, é conveniente que o ganho G_i seja independente da bobina. Isto permite que integradores e bobinas sejam calibrados independentemente, utilizando-se a Equação 9, para obter a corrente. Para isto é necessário ter R_s desprezível em relação a R . Usualmente, a acurácia de calibração de integradores e bobinas é da ordem de 1%. Nestas condições, valores razoáveis para R são tais que

$$R_s \leq 0,005 R. \quad (21)$$

isto representa uma contribuição individual máxima de 0,5% de incerteza. Combinando contribuições individuais conforme regra quadrática, resulta num efeito desprezível para a incerteza final da medição. Deve ser lembrado que além das incertezas de calibração, existem incertezas de medição que usualmente são maiores que as de calibração.

Quando não é possível satisfazer a regra (21), deve ser utilizada a expressão (20).

6 Redução de ruídos

6.1 Ruído eletrostático

O ruído eletrostático pode ser reduzido por meio de blindagem eletrostática. Um outro método bastante eficiente consiste em construir um par de bobinas de Rogowski iguais e com helicidades opostas, como esquematizado na Figura 5. Os sinais magnéticos de interesse são sinais opostos ($+V_s$ e $-V_s$). Entretanto, o acoplamento eletrostático das bobinas com a fonte de ruído é praticamente independente das helicidades e resulta que os ruídos eletrostáticos devem ser aproximadamente iguais (V_E). Assim, num amplificador diferencial num integrador de diferença, os sinais eletrostáticos são eliminados.

6.2 Ruído magnético

A bobina de Rogowski simples esquematizada na Figura 1, constitui uma espira os 2 terminais (curva C). Assim, é sensível ao fluxo magnético na curva C. Este ruído magnético pode ser praticamente eliminado com um fio de retorno, como esquematizado na Figura 6. No caso de bobinas duplas, o fio de retorno não é necessário. Uma vez que o ruído magnético (M) deve ser essencialmente o mesmo nas duas bobinas, é cancelado de maneira análoga ao ruído eletrostático.

2 Bobina de simulação do plasma do TCA-BR (SP)

A calibração das bobinas de Rogowski e bobinas de posição do tokamak é feita na bobina SP, que simula a corrente de plasma do Tokamak TCA-BR. As características são resumidas na Figura 1 e Tabela 1.

A medição de corrente pode ser feita por um transformador de corrente TC, por um resistor R_o (shunt) ou por meio de uma bobina de Rogowski RB (ver Seção 3). A bobina RB enlaça as 50 espiras, enquanto que TC ou R_o permitem medir apenas a corrente de entrada na bobina SP. Deve ser observado que, dependendo do tipo de bobina a ser calibrada, pode ser vantajoso escolher o dispositivo de medição de corrente de forma a usar faixas de medição iguais nos instrumentos. Neste caso, por meio de repetição da calibração com instrumentos invertidos, eventuais erros sistemáticos dos instrumentos podem ser eliminados, extraído-se a média geométrica das constantes de calibração resultantes¹.

A Tabela 2 resume as características dos dispositivos de medição de corrente na bobina SP. Para o transformador de corrente ou resistor, a calibração é para a corrente de entrada. No caso da bobina de Rogowski RB1, a calibração se refere à corrente total nas 50 espiras que esta bobina enlaça. Deve ser observado que esta calibração é para os 2 enrolamentos da bobina. Para um único enrolamento, deve-se considerar a metade da calibração.

As incertezas no resistor R_o ou no transformador de corrente TC não são conhecidas. Estas incertezas foram estimadas em 0,5%, com base em testes de consistência, comparação com outros resistores e medições DC.

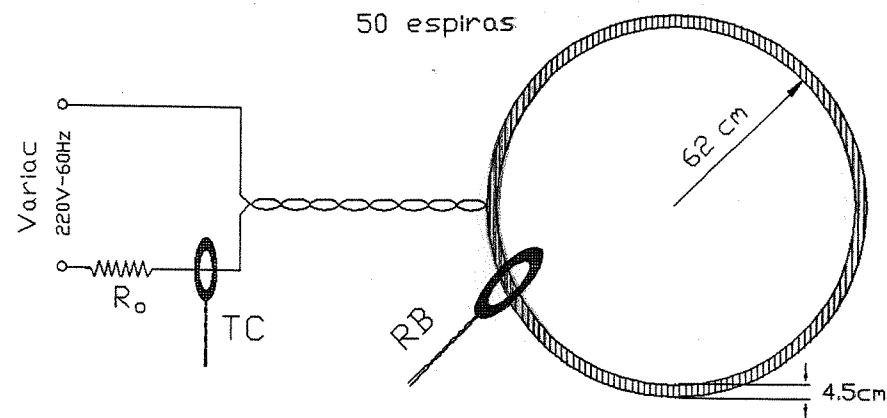


Figura 1: Desenho esquemático da bobina SP e dispositivos de medição.

¹Ver, por exemplo, Capítulo 6 de "Fundamentos da Teoria dos Erros", 2ª Edição, J.H.Vuolo, Editora Edgard Blücher, 1992.

Tabela 1: Características da bobina SP

Raio R_p	62 cm
Número de espiras	50
Fio	10 mm ² (\cong AWG-6)
Alimentação	220 V - 60 Hz e VARIAC
Corrente	0 a \approx 38 A
Indutância estimada	\approx 6 mH
Resistência estimada	\approx 380 m Ω

Tabela 2: Medição de corrente da bobina SP

Transformador de corrente (TC) Pearson Electronics - Modelo 411	(100.0 \pm 0.5) mV/A (0.5%)
Resistor R_o (shunt comercial antigo)	(1.500 \pm 0.008) mV/A (0.5%)
Bobina de Rogowski RB1 (Seção 3) - 2 enrolamentos - 1 enrolamento	(139.4 \pm 1.4) mV/kA em 60 Hz (69.7 \pm 0.7) mV/kA em 60 Hz

3 Bobinas de Rogowski de uso geral (RB)

Bobinas de Rogowski de uso geral são as mesmas já utilizadas no Tokamak TBR-1. Estas bobinas têm dois enrolamentos com helicidades opostas e montadas num suporte de cerca de 140 mm de diâmetro.

A constante de calibração pode ser calculada pelas Equações 10 e 13 da Seção 1:

$$K_{st} = \frac{\mu_o N A}{2 \pi r_o} \quad \text{onde} \quad r_o = \frac{l}{\ln \frac{r_{ext}}{r_{int}}} \quad (1)$$

Esta constante K_s também pode ser obtida diretamente, pelo procedimento de calibração indicado na Seção 1.4.

A Tabela 1 resume as características das bobinas denominadas RB1, RB2 e assim por diante. As bobinas de RB1 a RB6 são construídas em suporte de celeron e podem abertas ao meio, de forma a serem facilmente montadas num condutor. As bobinas de RB10 a RB15 são montadas em suporte inteiriço de nylon.

O valor de K_s para RB1 a 5 é a média obtida de calibração antiga (0,364 mVs/kA) com uma calibração recente (0,370 mVs/kA). Na calibração antiga (1981) foi utilizado um "shunt" ($R_o = 0,984 m\Omega$) e na calibração recente foi usado um transformador de corrente de 100 mA/V. A incerteza padrão é estimada em 1%. Para as demais bobinas, os valores antigos foram corrigidos na mesma proporção (0.367/0.364).

Utilizando integrador com ganho G_i , a corrente a ser medida é (Eq. 9 da Seção 1):

$$I = \frac{1}{G_i K_s} V \quad (2)$$

No caso de utilização de um único enrolamento, deve ser utilizada $K_s/2$.

A resistência ôhmica R_s de cada enrolamento de 120 espiras é indicada na Tabela 1. O valor é calculado a partir da resistividade de fio esmaltado. Esta resistência deve ser considerada se a resistência do integrador não é muito alta, conforme discutido na Seção 1.5.

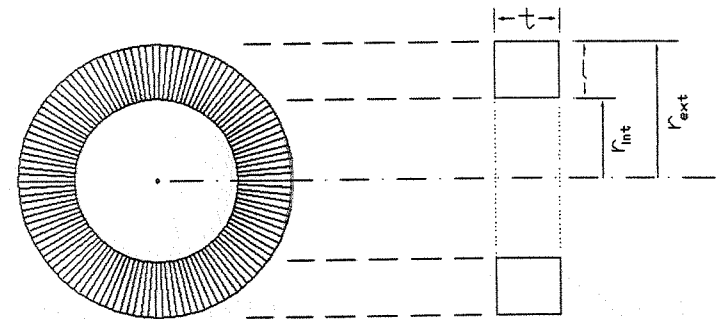


Figura 1: Desenho esquemático da bobina de Rogowski RB1 e outras.

Tabela 1: Características das bobinas RB.

Bobina	RB1 a 5	RB6	RB10 a 15
N	2 × 120	2 × 120	2 × 120
Fio	AWG 22	AWG 22	AWG 22
$R_s (\Omega)$	≈ 0.54	≈ 0.54	≈ 0.54
$r_{ext} (mm)$	69.1	69.1	68.6
$r_{int} (mm)$	50.4	50.4	50.0
$r_o (mm)$	57.0	57.0	60.1
$l (mm)$	18.0	18.0	19.0
$t (mm)$	24.1	25.0	25.0
$K_{st} (mV s/kA)$ $\sigma_K (mV s/kA)$	0.365 ± 0.007	0.379 ± 0.007	0.379 ± 0.007
$K_s (mV s/kA)$ $\sigma_K (mV s/kA)$	0.367 ± 0.004	0.381 ± 0.006	0.395 ± 0.008

Tabela 2: Medições e cálculos para calibração e teste de consistência da bobina RB1, utilizando a bobina SP e transformador de corrente TC.

Calibração da bobina RB1 (07/04/97)

RB1 mV Keithley	TC mV Minipa	I kA	$K_s = V_s / I_w$ mVs/kA	
9.21	132.0	0.065	0.3739	1.78E-05
13.54	196.0	0.097	0.3702	2.62E-07
24.39	354.0	0.175	0.3692	2.22E-07
36.37	530.0	0.262	0.3677	3.79E-06
49.36	720.0	0.356	0.3674	5.32E-06
media = (0.3697 +/- 0.0012) mVs/kA				

Valor calculado :

$$K_s = \mu A n \quad \mu = 1.26E-06 \text{ SI}$$

$$A = 0.000434 \text{ m}^2 \text{ +/- } 1\%$$

$$n = N / 2\pi r = 670.1261 \text{ espiras/m}$$

K calculada com incerteza estimada em 2% :

$$K_{sc} = 3.65E-07 \text{ Vs/A} = (0.3653 \text{ +/- } 0.0073) \text{ mVs/kA}$$

K experimental com incerteza estimada em 1% :

$$K_s = (0.3697 \text{ +/- } 0.0037) \text{ mVs/kA}$$

Valor antigo de K :

$$K_s = (0.3640 \text{ +/- } 0.0036) \text{ mVs/kA}$$

Média dos 2 valores :

$$K_s = (0.3668 \text{ +/- } 0.0037) \text{ mVs/kA}$$

$$\text{ou } K_s = (0.367 \text{ +/- } 0.004) \text{ mVs/kA}$$

Teste de consistência

Preto + Amarelo - mV Minipa	Soma mV	RB1 Ir(A)	TC mV Keithley	TC I _{tc} (A)	Ir/I _{tc}
18.3	18.0	36.3	262.4	514	51.0
38.8	38.3	77.1	557.3	1110	50.2
62.9	61.7	124.6	900.6	1803	49.9
78.8	77.6	156.4	1130.4	2273	49.7
91.6	90.0	181.6	1312.6	2635	49.8
107.1	105.2	212.3	1534.5	3074	49.9
131.9	129.7	261.6	1890.8	3800	49.8

media= 50.1

4 Bobina para medição de corrente toroidal (MT)

4.1 Descrição da bobina de Rogowski MT

A bobina de Rogowski para medição da corrente toroidal é esquematizada na Figura 1. Esta bobina é desmontável, sendo constituída de 4 bobinas A1/A2/B1/B2 indicadas na Figura 1. As características destas bobinas são resumidas na Tabela 1.

A sensibilidade K_s pode ser estimada pela Equação 7 da Seção 1:

$$K_{sc} = \mu_o n A \simeq 7,65 \text{ mVs/kA}, \quad (1)$$

onde o número de espiras por unidade de comprimento (n) foi estimado usando as dimensões médias e o número total de espiras. O índice c na constante K_s indica valor calculado. A rigor, a expressão acima é válida para n constante. Entretanto, existem descontinuidades nos cantos da bobina, como mostrado na Figura 1.

A indutância da bobina MT pode ser estimada usando uma aproximação toroidal:

$$L_s = \frac{\mu_o N^2 A}{2\pi r_o}. \quad (2)$$

No caso de um toróide, o raio médio é dado pela Equação 13 da Seção 1. No caso da bobina MT, pode-se considerar um raio equivalente de toróide, de forma que resulte um mesmo valor de K_s para mesma área A e mesmo número total de espiras N .

$$K_s \approx 7,65 \text{ mVs/kA} = \frac{\mu_o N A}{2\pi r_o}. \quad (3)$$

e obtém-se

$$L_s \simeq \frac{\mu_o N^2 A}{2\pi r_o} = N K_s \approx 22 \text{ mH}. \quad (4)$$

Resulta desta aproximação acima o seguinte valor equivalente para o raio r_o :

$$r_o \simeq \frac{\mu_o N A}{2\pi K_s} = 11 \text{ cm} \quad (5)$$

Isto corresponde aproximadamente ao raio médio geométrico da bobina MT.

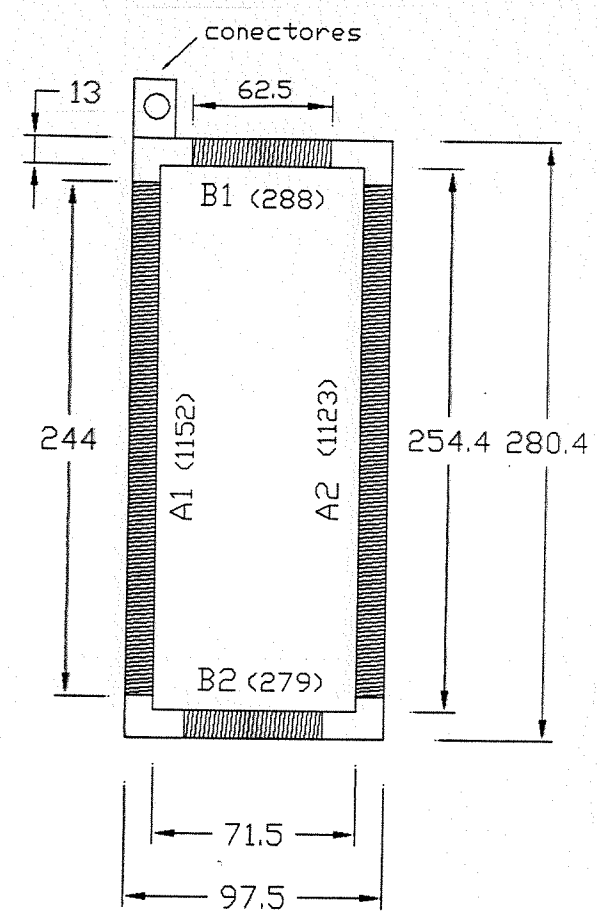
A Tabela 1 mostra também as indutâncias estimadas de cada um dos 4 segmentos da bobina (A1/A2/B1/B2), aproximando-os por solenóides:

$$L_s \simeq \mu_o n^2 A L, \quad (6)$$

onde L é o comprimento do segmento.

4.2 Calibração da bobina MT

A calibração da bobina é feita na bobina SP, descrita na Seção 2. As medições foram realizadas com multimetros Minipa ET2001 de $3\frac{1}{2}$ dígitos e Keithley 175 de $4\frac{1}{2}$ dígitos. Foram realizadas (09/95) 4 séries de medições, utilizando resistor (shunt) de $1,50 \text{ m}\Omega$ ou



RA1=168.3 Ω	Largura das bobinas:
RA2=164.0 Ω	121 mm
RB1=40.7 Ω	Dimensões médias:
RB2=42.0 Ω	267.4 X 84.5 mm ²
N ^o de espiras indicado	

Figura 1: Desenho esquemático da bobina de Rogowski MT.

Tabela 1: Características das bobinas A1, A2, B1 e B2.

	A1	A2	B1	B2	MT
$R_s (\Omega)$	168.3	164.0	42.0	40.7	415
N	1152	1123	288	279	2842
n (esp/mm)	~ 4	~ 4	~ 4	~ 4	4.04
A (cm ²)	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1
L (mH)	~ 8	~ 8	~ 2	~ 2	≈ 22

transformador de corrente (TC) de 100 mV/A para medição da corrente na bobina SP e convertendo multímetros.

A Tabela 2 mostra uma série de medições. A Tabela 3 resume os resultados das 4 séries de medições. O valor médio é

$$K_s = (7,424 \pm 0,045) \text{ mVs/kA}, \quad (7)$$

A incerteza padrão é estimada a partir da incerteza estatística σ_A (Tipo A) e considerando a incerteza tipo B (σ_B) de 0,5% devido à calibração do "shunt" e do transformador de corrente¹.

A resistência ôhmica da bobina MT é relativamente alta (415 Ω). Quando a bobina for utilizada com um integrador RC de resistência não muito alta, o ganho na integração é dado pela Equação 20 da Seção 1.5:

$$G_i = \frac{1}{\omega C (R + R_s)} = G'_i \frac{R}{(R + R_s)}, \quad (8)$$

onde G'_i é o ganho do integrador, obtido por calibração.

Um teste de variação da posição da bobina MT em relação ao condutor resultou numa diminuição de 7,5% no sinal. A tensão V_s diminuiu de 2780 mV para 2580 mV, conforme o condutor foi deslocado do centro de MT para o vértice. Esta variação relativamente alta deve, provavelmente à descontinuidade do enrolamento nos vértices da bobina MT.

¹Incertezas tipo A e tipo B são definidas no livro "Fundamentos da Teoria dos Erros", 2ª Ed., J.H.Vuolo, Edgard Blücher, São Paulo (1996).

Tabela 2: 4ª série de medições para calibração da bobina MT.

V TC Keithley V	I A	V (MT) Minipa V	K mV/A	dif ²
0.502	251	0.73	2.908	0.013581
1.006	503	1.43	2.843	0.002613
1.504	752	2.13	2.832	0.00165
2.000	1000	2.82	2.820	0.000794
2.500	1250	3.52	2.816	0.000584
3.000	1500	4.22	2.813	0.000462
3.500	1750	4.91	2.806	0.000193
3.735	1868	5.24	2.806	0.000198
média dos 6 últimos = (2.8156 +/- 0.0114) mV/A				
Constante efetiva de calibração: $V_s = K_s (dI/dt)$ $V_{sef} = K_s w I_{ef}$ $K = K_s w$				
$K_s = (7.469 +/- 0.030) \text{ s mV/kA}$				

Tabela 3: Resultados das 4 séries de medições para a bobina MT

	Setembro/1995	K_s
1ª série	Shunt-Minipa e V_s -Keithley	$(7.406 \pm 0.003) \text{ mVs/kA}$
2ª série	Shunt-Keithley e V_s -Minipa	$(7.462 \pm 0.025) \text{ mVs/kA}$
3ª série	TC-Minipa e V_s -Keithley	$(7.360 \pm 0.021) \text{ mVs/kA}$
4ª série	TC-Keithley e V_s -Minipa	$(7.469 \pm 0.030) \text{ mVs/kA}$
	Valor médio	$(7.424 \pm 0.045) \text{ mVs/kA}$
	σ_A	0.025 mVs/kA
	σ_B	0.037 mVs/kA

5 Bobinas para medição da corrente de plasma

(RPA e RPB)

5.1 Descrição das bobinas RPA e RPB

As bobinas RPA e RPB são praticamente iguais e montadas em caixas de aço inox A e B, respectivamente. O desenho esquemático das bobinas é mostrado na Figura 1 e as características são resumidas na Tabela 1. A Figura 2 mostra o posicionamento das caixas A e B em relação à câmara do Tokamak TCA-BR. A Figura 3 mostra a posição (V1) da bobina dentro da caixa.

As bobinas, as caixas de inox e suporte são originais do Tokamak TCA. Na montagem do Tokamak TCA-BR, os suportes não foram utilizados, tendo sido as caixas montadas diretamente na câmara de vácuo com espaçadores de teflon. O suporte permitiria ajustar o alinhamento da caixa. Este alinhamento fino não é importante, no caso de bobinas de corrente e de posição. Para bobinas mais críticas tal como a diamagnética, isto seria útil.

As bobinas são enroladas em 4 suportes cilíndricos de teflon, de 9,8 cm de diâmetro e com rosca de 1 fio por milímetro. A bobina tem comprimento total de $\cong 215$ cm e cerca de 2150 espiras. Nos vértices, as extremidades dos enrolamentos ficam bastante próximos. Assim, o efeito de não regularidade no espaçamento das espiras, nas ligações dos segmentos pode ser desprezado. De qualquer modo, foi verificada experimentalmente a dependência praticamente desprezível do sinal das bobinas com relação à posição da corrente.

5.2 Cálculo da constante de calibração

A constante de calibração pode ser calculada pela Equação 7 da Seção 1.2:

$$k_{sc} = \mu_0 n A = (0.0865 \pm 0.0017) \text{ mVs/kA}. \quad (1)$$

Devido à grande regularidade de n e descontinuidade muito pequena nos vértices das bobinas, espera-se que o valor calculado K_{sc} seja muito próximo do experimental, com diferença determinada essencialmente pela incerteza na área A . Entretanto, é difícil obter esta área com acurácia melhor que 2%, uma vez que o diâmetro real da bobina tem incerteza estimada em 1%. Estes valores são utilizados para obter a incerteza acima.

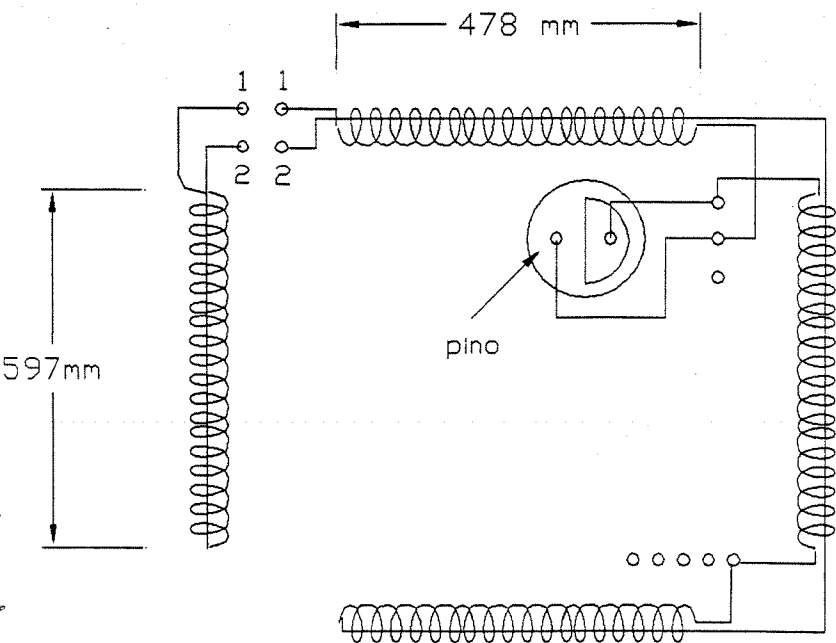
A constante de calibração indicada em documento original do Tokamak TCA é

$$C_{bob} = 10.6 \text{ kA/mVs} \quad \text{e assim,} \quad k_{so} = \frac{1}{C_{bob}} = 0.0943 \text{ mVs/kA}. \quad (2)$$

Este resultado se explica se for utilizado o valor de 9.8 mm para o diâmetro da bobina. Entretanto, este valor é incorreto porque deve ser subtraído o diâmetro do fio 0,44 mm. De qualquer modo, o valor acima é cerca de 10% maior que o obtido diretamente por calibração.

Tabela 1: Características das bobinas RPA e RPB.

	RPA	RPB
n	1 espira/mm	1 espira/mm
N	$\cong 2150$ espiras	$\cong 2150$ espiras
Diâmetro da espira	$(9.36 \pm 0.10) \text{ mm}$	$(9.36 \pm 0.10) \text{ mm}$
A	$(68,8 \pm 1.5) \times 10^{-6} \text{ m}^2$	$(68,8 \pm 1.5) \times 10^{-6} \text{ m}^2$
Fio	\approx AWG-26 $\cong 0,44 \text{ mm} - 137 \text{ m}\Omega/\text{m}$	\approx AWG-26 $\cong 0,44 \text{ mm} - 137 \text{ m}\Omega/\text{m}$
Resistência medida	9.26Ω a $(\approx 25^\circ\text{C})$	9.28Ω a $(\approx 25^\circ\text{C})$
Indutância estimada	0.19 mH	0.19 mH
K_{sc} (calculado)	(0.0865 ± 0.0018) (mVs/kA)	(0.0865 ± 0.0018) (mVs/kA)
K_s (final considerado)	(0.0858 ± 0.0007) (mVs/kA)	(0.0859 ± 0.0007) (mVs/kA)



RPA

Bobina de Rogowski da caixa A

Posição: $120^\circ - 11\text{mm} = 119^\circ$

10 espiras por cm

Figura 1: Desenho esquemático das bobinas RPA e RPB para medição da corrente de plasma no Tokamak TCA-BR.

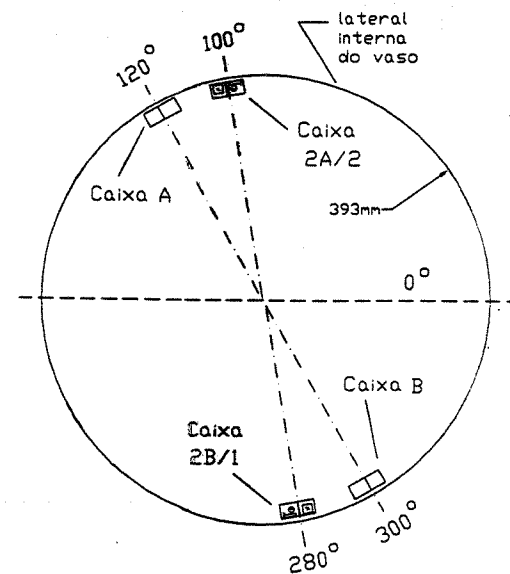


Figura 2: Posição das caixas A e B em relação à câmara do Tokamak TCA-BR. Os ângulos se referem à marcação original da câmara.

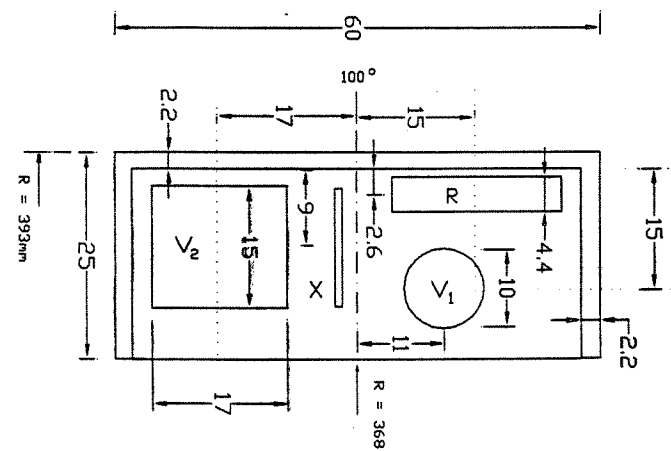


Figura 3: Posição (V1) das bobinas RPA e RPB nas caixas A e B.

Tabela 2: Exemplo típico de medições para calibração da RPA.

Transformador corrente - 100 mV/A		I kA	Ks=Vs/Iw mVs/kA
Keytley RPA mV	Minipa TC mV		
6.52	396	0.198	0.0873
12.95	792	0.396	0.0867
19.51	1188	0.594	0.0871
25.95	1584	0.792	0.0869
32.38	1980	0.990	0.0868
38.95	2376	1.188	0.0870
45.44	2772	1.386	0.0870
51.91	3168	1.584	0.0869
58.40	3564	1.782	0.0869
64.95	3960	1.980	0.0870
media = (0.08697		+/-	0.00006) mVs/kA
			0.07 %

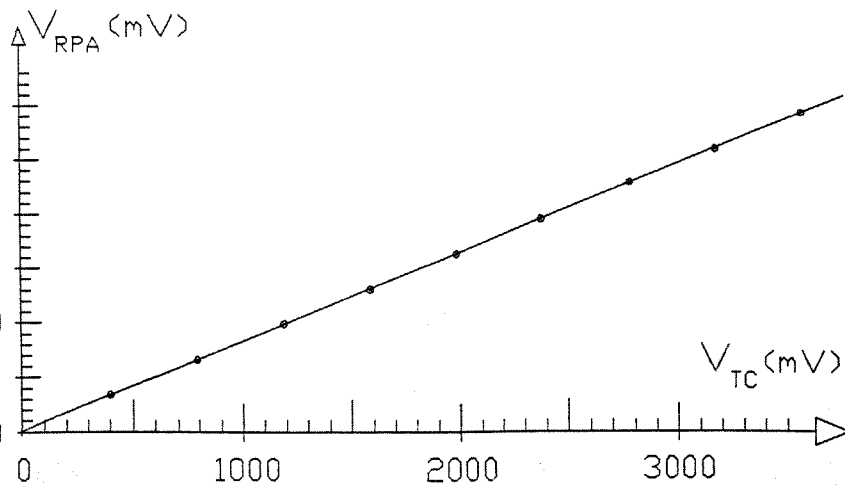


Figura 4: Gráfico da tensão na bobina RPA em função da corrente na bobina SP.

5.3 Indutância das bobinas RPA e RPB

A indutância pode ser estimada aproximando a bobina RP por um toróide:

$$L_s = \frac{\mu_o N^2 A}{2\pi r_o} \quad (3)$$

onde o raio r_o é tal que resulte o mesmo valor de K_s para mesmo número N de espiras e mesma área A :

$$L_s \simeq \frac{\mu_o N^2 A}{2\pi r_o} = N K_s \approx 0.19 \text{ mH}. \quad (4)$$

O raio equivalente que resulta desta aproximação é

$$r_o = \frac{\mu_o N A}{2\pi K_s} = 34 \text{ cm} \quad (5)$$

Este valor é bastante consistente com as dimensões das bobinas RPA e RPB.

5.4 Calibração das bobinas

A calibração das bobinas RPA e RPB é feita na bobina SP, como descrito na Seção 1.4. A medição de corrente é feita como descrito na Seção 2, usando resistor (shunt) $R_o = 1,50 \text{ m}\Omega$ ou transformador de corrente (TC) de 100 mV/A . A Tabela 2 e Figura 4 mostram uma série típica de medições para calibração da bobina RPA.

Por algum motivo que não foi possível determinar, ocorreu discrepância grande entre os resultados de medições realizadas em 10/95 e em 10/96, mostrados na Tabela 3. Por isso, a calibração de RPA foi repetida 7 vezes, modificando condições experimentais. As medições foram realizadas com "shunt" ou transformador de corrente (TC), com bobina em posição normal ou invertida (BN ou BI), cabos e medidores longe ou perto da bobina SP (CL ou CP) e com ou sem o suporte da caixa da bobina (CS ou SS). Apesar disso, não foi possível determinar a origem da discrepância entre os resultados. Uma possível explicação é a proximidade de estruturas de ferro próximas ao arranjo experimental. Deve ser observado que cada série de medições é muito bem comportada, com flutuações estatísticas bastante pequenas. A incerteza estatística (tipo A) é a indicada na Tabela 3 para a média de cada série de medições e é sempre menor 0.1%.

Uma vez que não foi possível determinar a origem das flutuações, foi considerada uma média simples das médias das 7 séries de medições para o resultado experimental final. No cálculo da incerteza foi considerada a incerteza estatística das 7 médias (0.8%) e uma incerteza tipo B de 0.5% devido a calibração do transformador de corrente ou resistor R_o .

Como resultado final foi adotada a média do resultado experimental com o resultado calculado teoricamente, que pode ser considerado bastante confiável. Entretanto, foi considerada a média ponderada pelas incertezas¹. De qualquer modo, o resultado final considerado difere muito pouco do resultado da calibração experimental.

¹ Por exemplo, ver Seção 11.2 do livro "Fundamentos da Teoria dos Erros", 2ª Ed., J.H.Vuolo, Ed. Edgard Blücher, São Paulo (1996).

Tabela 3: Resultados de diversas calibrações da bobina RPA.

Data	detalhes	K_s
26/10/95	TC-BN-CL-CS	$(0.0870 \pm 0.00003) \text{ mVs/kA}$ (0.03%)
23/10/96	TC-BI-CP-CS	$(0.0831 \pm 0.00005) \text{ mVs/kA}$ (0.06%)
23/10/96	Shunt-BI-CP-CS	$(0.0833 \pm 0.00006) \text{ mVs/kA}$ (0.07%)
24/10/96	TC-BI-CP-CS	$(0.0849 \pm 0.00007) \text{ mVs/kA}$ (0.09%)
28/10/96	TC-BI-CL-CS	$(0.0866 \pm 0.00007) \text{ mVs/kA}$ (0.08%)
28/10/96	TC-BN-CL-CS	$(0.0871 \pm 0.00007) \text{ mVs/kA}$ (0.08%)
26/11/96	TC-BN-CL-SS	$(0.0870 \pm 0.00006) \text{ mVs/kA}$ (0.07%)
	Média experimental	$(0.0856 \pm 0.0008) \text{ mVs/kA}$ (0.8%)
	Média final considerada	$(0.0858 \pm 0.0007) \text{ mVs/kA}$

Tabela 4: Comparação entre as bobinas RPA e RPB.

	RPA	RPB
Resistência ômica	9.26 Ω	9.28 Ω
Sinal para as bobinas juntas	40.57 mV	40.64 mV
Calibrações nas mesmas condições experimentais	K_s (mVs/kA) 0.08697 \pm 0.00006	K_s (mVs/kA) 0.08705 \pm 0.00016
Valores finais admitidos	K_s (mVs/kA) 0.0858 \pm 0.0007	K_s (mVs/kA) 0.0859 \pm 0.0007

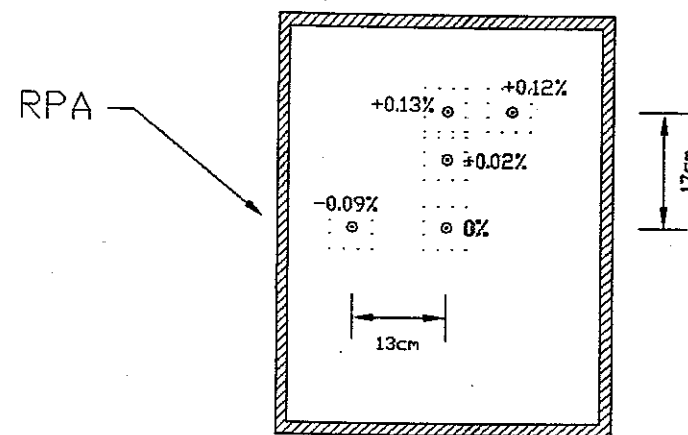


Figura 5: Sensibilidade da bobina RPA em função da posição da corrente na bobina SP.

5.5 Calibração da bobina RPB

A bobina RPB foi calibrada uma única vez em 26/11/96, nas mesmas condições experimentais que para a bobina RPA. O resultado das medições é mostrado na Tabela 4, mostrando que RPB tem calibração um pouco maior ($1,0017 K_s$). Além disso, foram feitas algumas medições do sinal das bobinas colocadas juntas para a mesma corrente na SP. O resultado é mostrado na Tabela 4 e também mostrou que RPB tem constante de calibração maior ($1,0014 K_s$).

Uma terceira comparação entre as bobinas é pela resistência ôhmica dos enrolamentos, que para a bobina RPB é um fator 1.0022 maior. Entretanto, deve ser observado que a área das espiras é proporcional à raiz quadrada do comprimento, que por sua vez é proporcional à resistência. Assim, as resistências indicam que a bobina RPB tem constante de calibração maior de um fator $\simeq \sqrt{1.0022} \simeq 1.0011$. Assim, a constante de calibração da bobina RPB é essencialmente a mesma da bobina RPA. Entretanto, foi considerado um fator de correção quase não significativo de 1,0014, que é a média dos fatores de correção acima.

Os resultados finais para as constantes de calibração são mostrados na Tabela 4.

5.6 Sensibilidade com relação à posição

A sensibilidade da bobina RPA em relação à corrente foi testada deslocando a bobina RPA em relação ao condutor de corrente. A corrente foi fixada em 1040 A, mas apresentou variações lentas da ordem de 0.5%.

A Figura 5 resume os resultados indicando a variação porcentual no sinal da RPA em relação ao sinal para a corrente no centro geométrico. Os resultados foram corrigidos em relação às variações na corrente. Como pode ser visto, as diferenças não são significativas e se confundem com os erros de medição.

5.7 Correção para integrador

A resistência ôhmica das bobinas RPA e RPB não é inteiramente desprezível ($R_s \simeq 9,3 \Omega$). Quando a bobina for utilizada com um integrador RC de resistência não muito alta, o ganho na integração é dado pela Equação 20 da Seção 1.5:

$$G_i = \frac{1}{\omega C (R + R_s)} = G_i' \frac{R}{(R + R_s)}, \quad (6)$$

onde G_i' é o ganho do integrador, obtido por calibração. Por exemplo, com resistência $R = 1 k\Omega$, resulta numa redução de aproximadamente 1% no ganho de integração.

6 Bobinas de posição do plasma (RC e RS)

6.1 Descrição das bobinas RCA, RCB, RSA e RSB

As bobinas RCA e RCB são bobinas tipo "cosseno". Essas bobinas são praticamente iguais e montadas nas caixas de aço inox A e B, respectivamente. As espiras são enroladas em 4 suportes de seção retangular de $17 \times 15 mm^2$, indicado por V2 na Figura 3 da Seção 5. As dimensões da bobina são semelhantes às das bobinas RPA e RPB para medição da corrente de plasma. A distribuição de espiras ao longo dos suportes é indicada na Figura 1, onde o sinal negativo indica enrolamento com helicidade invertida.

As bobinas RSA e RSB são bobinas tipo "seno". A Figura 1 mostra a distribuição de espiras, que são enroladas sobre as bobinas RCA e RCB.

As características das bobinas são resumidas na Tabela 1.

As bobinas, as caixas de inox e suporte são originais do Tokamak TCA. Os números de espiras indicados são obtidos num rascunho de projeto das bobinas, no qual faltam muitas informações e, além disso, existem dados conflitantes.

6.2 Campo de uma espira circular de corrente

O campo magnético devido a uma corrente I numa espira circular de raio a , tal como indicado na Figura 2, é dado por¹

$$B_r = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{z}{r \sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[-K + \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} E \right] = \frac{\mu_0 I}{2\pi} F_r, \quad (1)$$

e

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[K + \frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} E \right] = \frac{\mu_0 I}{2\pi} F_z, \quad (2)$$

onde K e E são, respectivamente, integrais elípticas completas de $1a$ e $2a$ classes², em função de

$$q^2 = \frac{4ar}{(a+r)^2 + z^2}. \quad (3)$$

A Figura 3 mostra os valores calculados do campo magnético vertical (B_z) nos suportes externo e interno e do campo radial (B_r) nos suportes superior e inferior. Tais valores devem ser multiplicados pelo fator de escala $\mu_0 I / 2\pi = 2 \times 10^{-7} I$.

¹Por exemplo, ver L. Landau et E. Lifchitz, "Électrodynamique des Milieux Continus", Éditions MIR, Moscou (1969).

²Por exemplo, ver "Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas", M. R. Spiegel, Editora McGraw-Hill, São Paulo (1973).

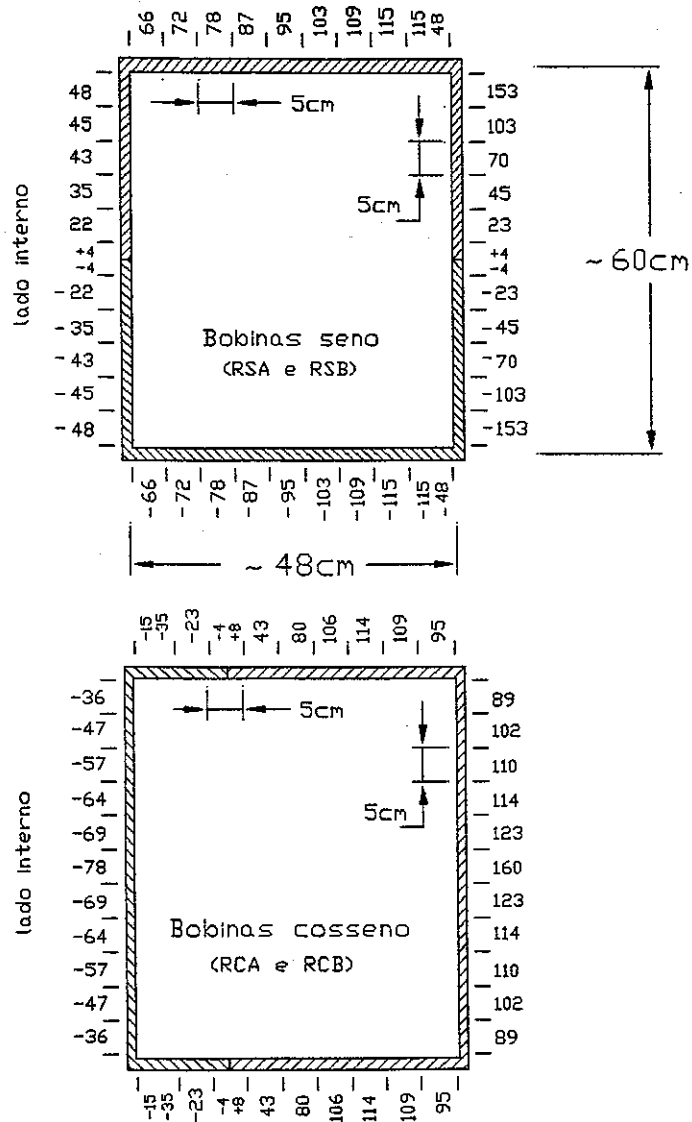


Figura 1: Desenho esquemático das bobinas RCA, RCB, RSA e RSB para medição da posição da corrente de plasma no Tokamak TCA-BR.

Tabela 1: Características das bobinas cosseno e seno.

	RC	RS
Tipo	Cosseno	Seno
N	≈ 3104 espiras	≈ 2966 espiras
N_0 espiras	suporte externo: ≈ 1236	suporte superior: ≈ 888
N_0 espiras	suporte interno: ≈ 624	suporte inferior: ≈ 888
Dimensões	$17.3 \times 15.3 \text{ mm}^2$	$18.0 \times 16.0 \text{ mm}^2$
Área A	$2.65 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	$2.88 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Fio	$\approx 0,28 \text{ mm} - 328 \text{ m}\Omega/\text{m}$	$\approx 0,28 \text{ mm} - 328 \text{ m}\Omega/\text{m}$
Resistências medidas	RCA: 69.6Ω a ($\approx 25^\circ\text{C}$) RCB: 69.9Ω a ($\approx 25^\circ\text{C}$)	RSA: 69.9Ω a ($\approx 25^\circ\text{C}$) RSA: 67.7Ω a ($\approx 25^\circ\text{C}$)
N estimado	≈ 3282 espiras	≈ 3076 espiras
Indutância estimada	$\approx 1.6 \text{ mH}$	$\approx 1.6 \text{ mH}$

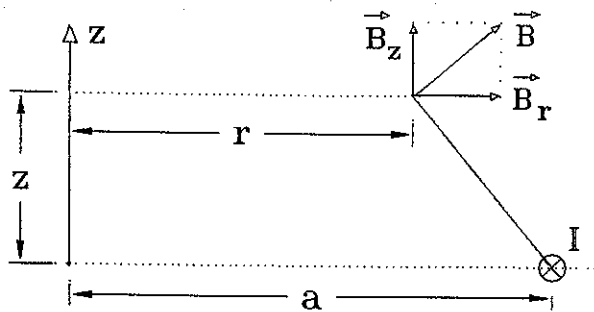


Figura 2: Coordenadas para cálculo do campo magnético de uma espira.

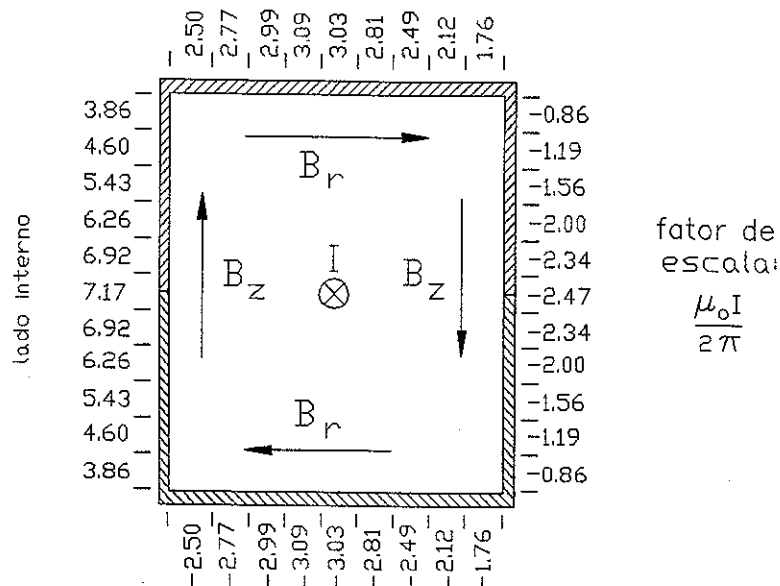


Figura 3: Campo magnético ao longo das espiras.

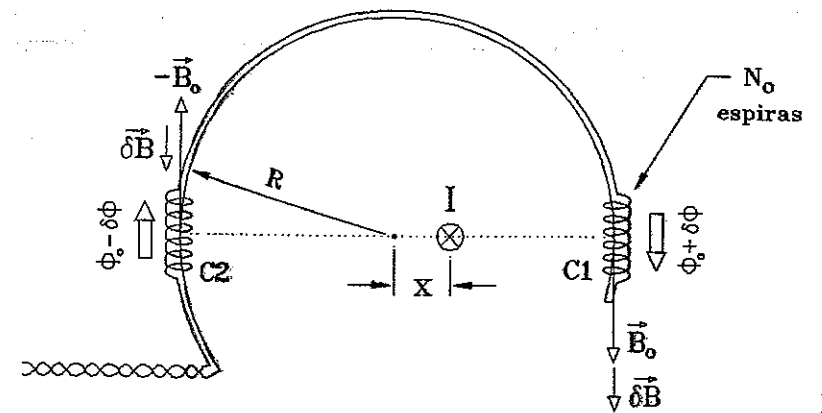


Figura 4: Modelo para estimativa da constante de calibração.

6.3 Estimativas das constante de calibração de RC e RS

Uma vez que a distribuição e o número de espiras não são muito confiáveis, não tem muito sentido um cálculo rigoroso da constante de calibração. Por isso, a constante de calibração será estimada de maneira bastante simplificada, como explicado a seguir.

Admitindo 2 bobinas simples C1 e C2 com N_0 espiras cada uma e um condutor retilíneo com corrente I (Figura 4), o campo magnético é dado por

$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}. \quad (4)$$

O fluxo magnético em cada bobina (C1 ou C2) é dado por

$$\Phi_0 = N_0 A B_0 = N_0 A \frac{\mu_0 I}{2\pi R}. \quad (5)$$

Para medição da posição, as bobinas C1 e C2 devem ter helicidades opostas e os fluxos em cada bobina se cancelam. Assim, o fluxo total no par de bobinas é nulo. Quando a corrente se desloca de uma distância x , a variação do campo nas bobinas é dada em aproximação de primeira ordem por

$$\delta B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \frac{x}{R} = B_0 \frac{x}{R}. \quad (6)$$

Esta variação representa um aumento do fluxo na bobina C1 e uma diminuição de fluxo na bobina C2. Assim, a variação de fluxo é dada por

$$2\delta\Phi = (\Phi_0 + \delta\Phi) - (\Phi_0 - \delta\Phi). \quad (7)$$

Assim, obtém-se

$$2\delta\Phi = 2N_o A \delta B = 2\varphi I \frac{\delta x}{R}, \quad (8)$$

onde $\Phi = I\varphi$. Isto é, φ é o fluxo por unidade de corrente.

A tensão induzida é dada por

$$V_s = \frac{d(2\delta\Phi)}{dt} = K x \frac{dI}{dt}, \quad (9)$$

onde

$$K_s = \frac{2}{R} \varphi, \quad (10)$$

Uma das simplificações para estimar a constante de calibração, consiste em utilizar esta expressão, considerando estimativas de φ para as bobinas reais e campos reais de uma espira de corrente. Entretanto, foram considerados apenas o fluxo φ como sendo o fluxo nos segmentos mais sensíveis das bobinas. Mais precisamente, para a bobina cosseno é considerado apenas o fluxo médio dos suportes vertical externo e vertical interno, uma vez que os enrolamentos nos suportes horizontais superior e inferior devem ser pouco sensíveis à posição horizontal e estão mais distantes da corrente.

No modelo considerado de fio retilíneo, as mesmas expressões valem também para a bobina seno. Neste caso, foi considerado apenas o fluxo do suporte horizontal superior, que é igual ao do inferior. Isto porque os enrolamentos dos suportes vertical externo e vertical interno, devem ser pouco sensíveis à posição vertical. A Tabela 2 mostra os resultados K_s dessas estimativas. Deve ser observado que são apenas estimativas que podem apresentar grandes erros.

6.4 Calibração das bobinas RC e RS

As bobinas são calibradas na bobina SP que simula a corrente de plasma. No caso da bobina cosseno, existe um erro devido ao fato que o raio da espira de corrente permanece constante, enquanto que o raio do plasma pode aumentar ou diminuir. Entretanto, para deslocamentos da ordem de centímetros, este erro não é significativo.

As Figuras 5, 6, 7 e 8 mostram os resultados de calibrações para as bobinas RCA, RCB, RSA e RSB. Em todos os casos, foram ajustadas retas a 11 pontos experimentais mais próximos de $x = 0$ ou $y = 0$. Além das constantes de calibração, são obtidos a posição correspondente a sinal "zero". Os resultados são mostrados na Tabela 2. Para as bobinas cosseno (RCA e RCB) as constantes K_h apresentam boa concordância entre si e também com a estimativa feita. Um resultado (K) obtido em documentação do TCA também é mostrado na tabela.

A Tabela 2 mostra também os valores da posição correspondente a sinal "zero" nas bobinas. Os valores correspondentes (x_o) para as bobinas RCA e RCB apresentam bom acordo entre si.

Em resumo, para as bobinas cosseno (RCA e RCB), podem ser admitidos os valores médios para a constante K_h e para x_o .

Para as bobinas seno (RSA e RSB) ocorre uma discrepância grande nas constantes de calibração e também na posição y_o . Por isso, as bobinas foram submetidas a verificação adicional, colocando-as juntas na bobina SP e realizando as medições nas mesmas condições.

Tabela 2: Características de calibração das bobinas RPC e RPS.

	RC	RS
Tipo	Cosseno	Seno
K_s (estimado)	13 ($\mu V s / k A c m$)	9 ($\mu V s / k A c m$)
Calibração das Bobinas A	$K_h = (10.39 \pm 0.17)$ ($\mu V s / k A c m$) Sinal nulo: $x_o = -17,6 mm$	$K_v = (8.68 \pm 0.18)$ ($\mu V s / k A c m$) Sinal nulo: $y_o = 1.3 mm$
Calibração das Bobinas B	$K_h = (10.38 \pm 0.17)$ ($\mu V s / k A c m$) Sinal nulo: $x_o = -19,0 mm$	$K_v = (14.66 \pm 0.24)$ ($\mu V s / k A c m$) Sinal nulo: $y_o = -9.3 mm$
Valor médio (calibração)	$K_h = (10.39 \pm 0.17)$ ($\mu V s / k A c m$)	
Sinal zero	$x_o = (-18 \pm 3) mm$	$y_o = (5 \pm 5) mm$
Sinais relativos	$x \simeq 10 cm$ -RCA: 40.79 mV $x \simeq 10 cm$ -RCB: 41.68 mV	$y \simeq 10 cm$ -RSA: 42.90 mV $y \simeq 10 cm$ -RSB: 67.92 mV
Campo vertical 1.25 kA na SP	RCA: 230.4 mV RCB: 224.5 mV	RSA: 236.5 mV RSB: 248.5 mV
K (TCA)	12.9 ($\mu V s / k A c m$)	14.5 ($\mu V s / k A c m$)

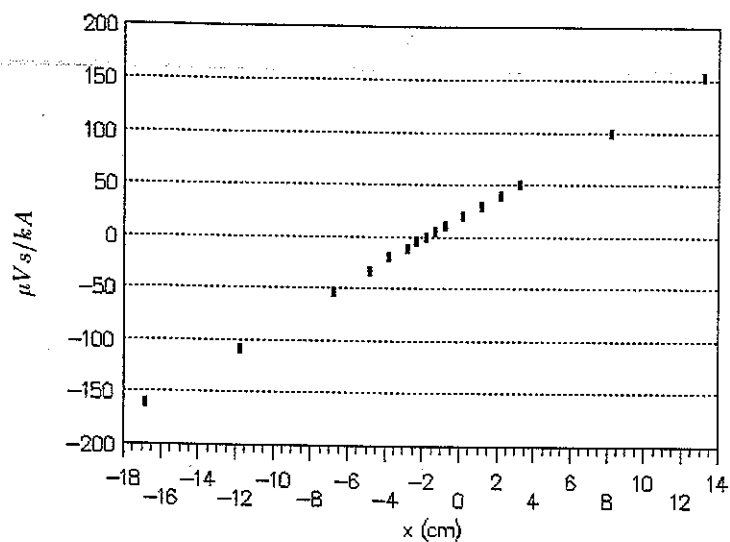


Figura 5: Resultados de medições para calibração da bobina RCA (cosseno) em função da posição horizontal x da corrente na bobina SP (1500 A).

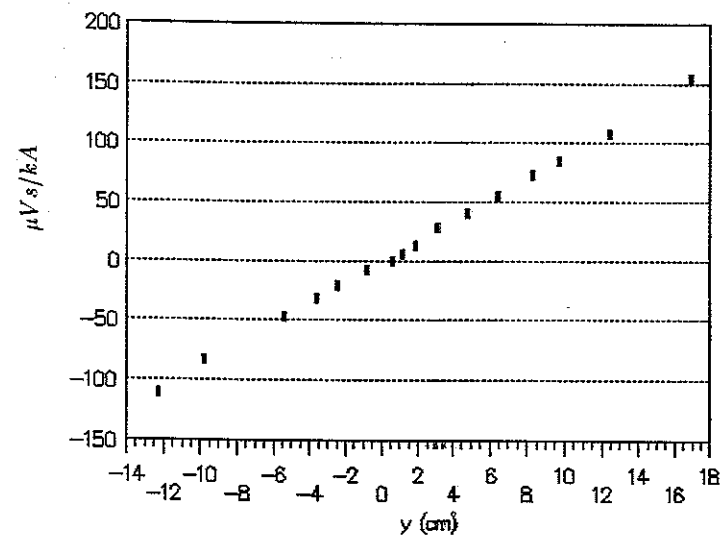


Figura 7: Resultados de medições para calibração da bobina RSA (seno) em função da posição horizontal x da corrente na bobina SP (1500 A).

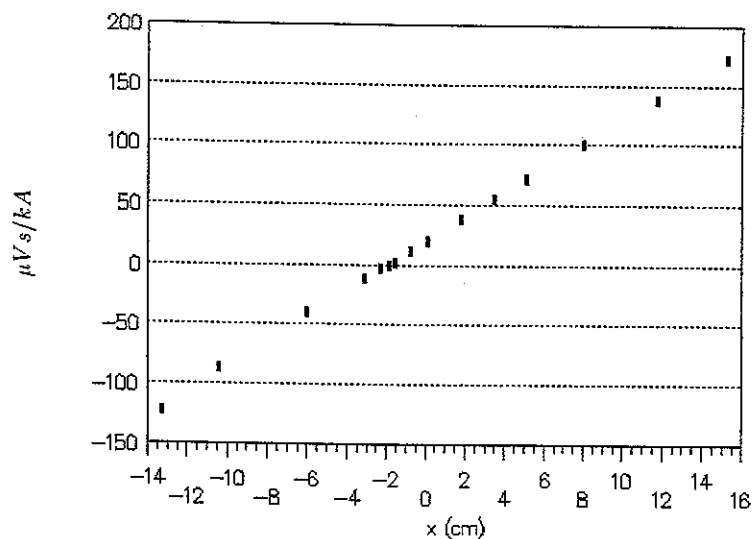


Figura 6: Resultados de medições para calibração da bobina RCB (cosseno) em função da posição vertical y da corrente na bobina SP (1500 A).

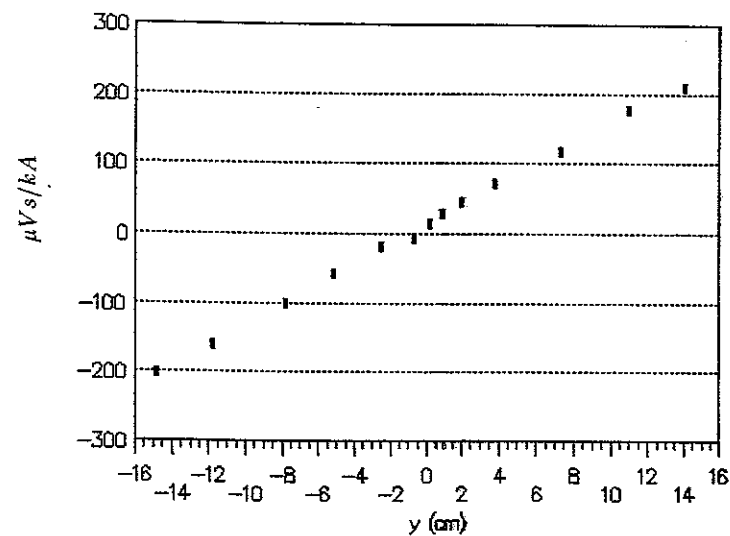


Figura 8: Resultados de medições para calibração da bobina RSB (seno) em função da posição vertical y da corrente na bobina SP (1500 A).

A Tabela 2 mostra os valores médios dos sinais obtidos. Como pode ser visto, verifica-se na bobina RSA um sinal aproximadamente 40% menor que na bobina RSB.

Um teste adicional foi realizado colocando as bobinas no centro da bobina SP para medir o campo vertical. Deve ser observado que a bobina cosseno mede essencialmente um campo vertical e a bobina seno mede essencialmente um campo radial. Assim, as bobinas seno (RSA e RSB) foram colocadas no centro da bobina SP, mas giradas de 90°. Neste caso, bobinas apresentaram sinais praticamente iguais.

Um outro detalhe a ser observado é que as bobinas RSA e RSB deveriam apresentar sinal zero para corrente muito próxima do centro geométrico dos suportes, devido à simetria dos enrolamentos e do campo magnético. Entretanto, para RSB isto ocorre para $y_0 = -9.3 \text{ mm}$. Isto é, quase 1 cm abaixo do centro geométrico e isto não corresponde à incerteza de medição, da ordem de 2 mm.

A discrepância entre RSA e RSB é bastante difícil de ser entendida, uma vez que as bobinas tem mesmo projeto, apresentam resistências ôhmicas iguais e mesma sensibilidade para campo aproximadamente uniforme.

Uma possível explicação é um desbalanceamento de espiras na bobina RSB, com maior número de espiras na parte superior. O sinal induzido pela corrente em cada espira é

$$V_{I_{esp}} = \frac{\mu_0 A}{2\pi\delta} \frac{dI}{dt} = K_{I_{esp}} \frac{dI}{dt}, \quad (11)$$

onde δ é a distância da corrente. Para $\delta \sim 30 \text{ cm}$, resulta $K_{I_{esp}} \sim 0.2 \mu\text{Vs}/kA$. Assim, bastam 30 espiras a mais para resultar em $K_I \sim 6 \mu\text{Vs}/kA$, que corresponde aproximadamente à diferença observada entre RSA e RSB. Admitindo como correta a calibração de RSA ($K_v = 8.68 \mu\text{Vs}/kAcm$, resultaria $K_v \sim 6 \mu\text{Vs}/kA$ para corrente aproximadamente $6/8.68 \approx 0.7 \text{ cm}$ acima do ponto de sinal zero. Isto está aproximadamente de acordo com o que se observa com a bobina RSB, que tem sinal zero para corrente cerca de 0.9 cm abaixo do centro geométrico.

6.5 Integração do sinal das bobinas

A integração do sinal das bobinas de posição pode ser feita como descrito na Seção 1.5. Para as bobinas de posição horizontal, o sinal na saída do integrador é dado por

$$V_h = G_i K_h I x \quad (12)$$

onde o G_i é o ganho de integração. Para um integrador de resistência R e capacitância C o ganho deve ser corrigido pela relação:

$$G_i = \frac{1}{\omega C (R + R_s)} = G'_i \frac{R}{(R + R_s)}, \quad (13)$$

onde G'_i é o ganho do integrador, obtido por calibração.

Para as bobinas de posição, o sinal é proporcional à posição e também à corrente. Para se obter sinal proporcional à posição, o sinal deve ser dividido pela corrente, eletronicamente ou numericamente.

Para as bobinas de posição vertical valem considerações análogas.

6.6 Sensibilidade ao campo vertical ou radial

A bobina de posição horizontal é sensível ao campo vertical. A sensibilidade ao campo vertical B_v pode ser estimada a partir do número de espiras ou a partir das medições indicadas na Tabela 2, para bobinas detetando o campo vertical no centro da bobina SP.

O número total de espiras de área nos suportes externo e interno é $N_1 \approx 1860$. Assim,

$$V_{h1} \approx N_1 A \frac{dB_v}{dt} = K_{h1} \frac{dB_v}{dt}, \quad (14)$$

resultando

$$K_{h1} = 0.49 \text{ Vs}/T. \quad (15)$$

Para as medições indicadas na Tabela 2, a corrente eficaz na bobina SP é de 1.25 kA, em 60 Hz. O campo eficaz pode ser estimado por:

$$B_v \approx \frac{\mu_0 I}{2a} = 1.27 \times 10^{-3} \text{ T}. \quad (16)$$

Assim resulta o valor eficaz:

$$\frac{dB_v}{dt} = \omega B_v \approx 0.48 \text{ (T/s)} \quad (17)$$

Assim, a estimativa para K_{h1} obtida das médias das medições da Tabela 2 é

$$K_{h1} \approx \frac{0.227 \text{ V}}{0.48 \text{ T/s}} \approx 0.47 \text{ Vs}/T. \quad (18)$$

A boa concordância com o resultado anterior ($K_{h1} = 0.49 \text{ Vs}/T$) é um pouco acidental pois os erros desta estimativa são bastante grandes, uma vez que o campo real deve ser menor que o campo médio dado pela Equação 16. Em compensação, os suportes superior e inferior da bobina devem detetar campo radial.

A estimativa para sensibilidade da bobina seno a campo radial é feita de maneira análoga, sendo $N_1 \approx 1780$ espiras. Obtém-se

$$K_{v1} = N_1 A = 0.51 \text{ Vs}/T. \quad (19)$$

Apesar de menor número de espiras, a área A é significativamente maior para as espiras das bobinas seno. Conforme os resultados das medições mostrados na Tabela 2,

$$K_{v1} \approx \frac{0.242 \text{ V}}{0.48 \text{ T/s}} \approx 0.50 \text{ Vs}/T. \quad (20)$$

Valem as mesmas considerações feitas para a bobina cosseno, quanto à coincidência dos resultados (19) e (20).

Os valores de K_{h1} ou K_{v1} são bastante altos, significando grandes ruídos indesejáveis nestas bobinas. No caso das bobinas seno, esses ruídos não devem ser muito significativos, uma vez que não devem existir campos radiais significativos na posição das bobinas, exceto o campo gerado pelo plasma. Entretanto, as bobinas cosseno detetam o campo vertical de equilíbrio do plasma no tokamak. Este campo é relativamente intenso e, como agravante, deve subir junto com a corrente de plasma.

O campo vertical de equilíbrio pode ser estimado dos resultados mostrados na Figura 3. Uma vez que o campo vertical externo deve levar a uma configuração de equilíbrio para a corrente de plasma, o campo vertical total deve ser aproximadamente o mesmo na parte interna e na parte externa da bobina³ Considerando os valores da Figura 3:

$$2.47 \frac{\mu_0 I}{2\pi} + B_{ve} \approx 7.17 \frac{\mu_0 I}{2\pi} - B_{vi}, \quad (21)$$

onde B_{ve} e B_{vi} são os valores do campo vertical no suporte externo e no suporte interno, respectivamente. Desprezando o índice de decaimento do campo vertical externo, estes campos são iguais:

$$\bar{B}_v \approx \frac{(2.47 + 7.17) \mu_0 I}{2} \approx 5 \times 10^{-4} I (kA). \quad (22)$$

Assim, para corrente de 100 kA e tempo de subida da ordem de 1 ms, resulta

$$\frac{dB_v}{dt} \sim 50 T/s \quad e \quad V_{h1} \sim 25 V. \quad (23)$$

Isto é, resulta num sinal espúrio bastante alto e que deve ser cuidadosamente compensado tirando uma amostragem do sinal correspondente ao campo vertical e usando um somador eletrônico.

7 Bobinas de fluxo vertical, radial e toroidal

7.1 Descrição das bobinas RFVA, RFVB, RFRA, RFRB e RFTB

As bobinas para medição de fluxo vertical, radial e toroidal (RFV, RFR e RFT) são bobinas semelhantes enroladas num tipo de carretel chato e comprido de fibra de vidro e montadas nas caixas de aço inox A e B. As bobinas RFV ou RFR são montadas na posição R da Figura 3 da Seção 5, enquanto que a bobina RFT corresponde à posição X, aproximadamente. Na caixa A não existe bobina RFT. Estas bobinas são também mostradas na Figura 1, a seguir. As dimensões das bobinas e outras características são resumidas na Tabela 1.

Os valores indicados para as dimensões e os números de espiras foram obtidos num rascunho de projeto original das bobinas. Estes números não são muito confiáveis, pois existem dados conflitantes neste projeto.

7.2 Estimativa da sensibilidade a campo vertical ou radial

A sensibilidade ao campo vertical ou radial pode ser estimada a partir do número de espiras:

$$V = K \frac{dB}{dt} \quad \text{onde} \quad K = NA. \quad (1)$$

Considerando valores de N e A , obtém-se as estimativas para K , indicadas na Tabela 1.

A sensibilidade pode ser obtida diretamente, por calibração, colocando as bobinas no centro da bobina SP (Seção 2), como mostrado nas Figuras 2, 3 e 4.

O campo magnético de uma espira circular de raio a é dado pelas Equações 1 e 2 da Seção 6. A componente vertical do campo pode ser escrita na forma:

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} F \quad (2)$$

Os valores calculados de F são mostrados nas Figuras 2, 3 e 4, para alguns pontos. Conforme pode ser visto, em cada caso, o valor de F varia pouco do centro até a extremidade da bobina de interesse (RFV, RFR ou RFT). Assim, foi considerado o valor médio \bar{F} entre os valores de F no centro e na extremidade da bobina RFV, RFR ou RFT. O valor médio é indicado na Tabela 1, em cada caso. As incertezas nestas aproximações são certamente menores que 1% no caso das bobinas RFV e RFR e menores que 3% no caso da bobina RFT. Estas incertezas foram incluídas na estimativa da incerteza final.

Assim, podem ser estimados os valores do campo vertical médio e respectiva derivada em relação ao tempo. Os valores eficazes são dados por

$$\left[\frac{dB_z}{dt} \right]_{ef} = [\omega B_z]_{ef} = \frac{\mu_0 I \omega}{2\pi} \bar{F}, \quad (3)$$

onde I é o valor eficaz da corrente total na bobina SP.

³Um cálculo mais detalhado do campo vertical de equilíbrio de um tokamak é feito na Referência 7. Bobinas de posição e campo vertical de equilíbrio para o Tokamak TBR-1 são discutidos na Referência 8.

Tabela 1: Características das bobinas RFV e RFR.

	RFV	RFR	RFT
Dimensões	$\approx 21 \times 431 \text{ mm}^2$	$\approx 22 \times 502 \text{ mm}^2$	$\approx 19 \times 434 \text{ mm}^2$
Área A	$9.05 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	$11.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	$8.25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
Resistência (a $\approx 25^\circ \text{C}$)	RFVA: 9.69Ω RFVB: 9.82Ω	RFRA: 71.14Ω RFRB: 71.18Ω	RFTB: 153.4Ω
N (estimado)	$\sim 2 \times 20$ espiras	$\sim 2 \times 60$ espiras	$\sim 2 \times 180$ espiras
K (estimado)	$\sim 0.36 \text{ Vs/T}$	$\sim 1.3 \text{ Vs/T}$	$\sim 3.0 \text{ Vs/T}$
\bar{F}	3.708 m^{-1}	4.109 m^{-1}	6.441 m^{-1}
Calibração das Bobinas A		$V_{ef} = 511 \text{ mV}$ $I = 1250 \text{ A} \times 60 \text{ Hz}$ $K_e = (1.32 \pm 0.04) \text{ Vs/T}$	
Calibração das Bobinas B	$V_{ef} = 141 \text{ mV}$ $I = 1250 \text{ A} \times 60 \text{ Hz}$ $K_e = (0.403 \pm 0.012) \text{ Vs/T}$	$V_{ef} = 502 \text{ mV}$ $I = 1250 \text{ A} \times 60 \text{ Hz}$ $K_e = (1.30 \pm 0.04) \text{ Vs/T}$	$V_{ef} = 1375 \text{ mV}$ $I = 1250 \text{ A} \times 60 \text{ Hz}$ $K_e = (2.27 \pm 0.11) \text{ Vs/T}$

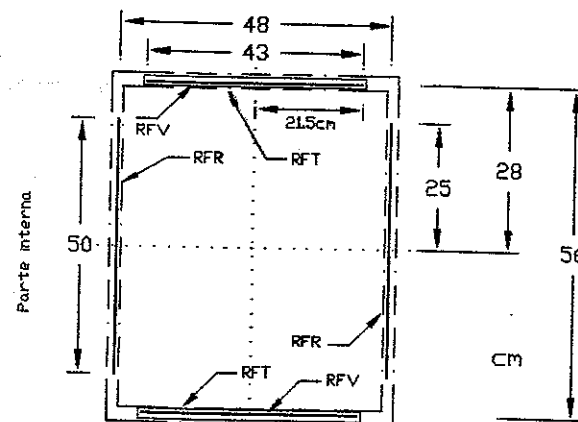


Figura 1: Posições das bobinas RFV e RFR nas caixas de inox.

Para as medições indicadas na Tabela 2, $[dB_z/dt]_{ef} = 0.0942 \bar{F} T/s$. Assim, a estimativa experimental K_e é obtida das medições V_{ef} é dada por

$$K_e = \frac{V_{ef}}{0.0942 \bar{F}} \quad (4)$$

Os valores de K_e são apresentados na Tabela 1. Para a bobina RFVA a tensão obtida foi $V_{ef} = 1339 \text{ mV}$, resultando $K_e = 3,83 \text{ Vs/T}$. Este resultado é completamente absurdo, pois a resistência ôhmica da bobina é a mesma que a da bobina RFVB e o número de espiras não pode ser maior. Para evitar confusão, este resultado foi omitido da Tabela 1. Uma explicação plausível é que tenha havido contacto ruim na medição e que isto não tenha sido percebido. Se isto ocorreu, pode-se considerar para RFVA a mesma calibração que a da bobina RFVB. Entretanto, deve ser feita uma verificação de que as bobinas resultam em mesmo sinal, para um mesmo campo vertical de teste.

7.3 Integração do sinal das bobinas

A integração do sinal das bobinas pode ser feita como descrito na Seção 1.5. O sinal na saída do integrador é dado por

$$V_s = G_i K_e B \quad (5)$$

onde o G_i é o ganho de integração. Para um integrador de resistência R e capacitância C o ganho deve ser corrigido pela relação:

$$G_i = \frac{1}{\omega C (R + R_s)} = G'_i \frac{R}{(R + R_s)}, \quad (6)$$

onde G'_i é o ganho do integrador, obtido por calibração.

8 Bobinas de fluxo vertical axial (VC1, VC2 e VC3)

8.1 Descrição das bobinas VC1, VC2 e VC3

As bobinas VC1, VC2 e VC3 têm seção retangular e são enroladas usando cabo coaxial fino. Os enrolamentos são feitos em canais num mesmo suporte chato de celeron, de forma que as bobinas ficam num mesmo plano. Estas bobinas permitem a medição de fluxo vertical no eixo do transformador de aquecimento ôhmico (OHT). As características das bobinas são resumidas na Tabela 1.

Estas bobinas podem ser úteis para captar sinal devido ao campo vertical do OHT para a compensação de ruídos.

Uma vez que não parece haver grande interesse numa medição acurada deste fluxo vertical e, talvez, essas bobinas nem sequer sejam montadas no tokamak, estas bobinas não foram calibradas. De qualquer modo, uma vez que a área média é muito bem definida e o número de espiras é exato, a constante de calibração $K = NA$ deve ser bastante acurada, com incertezas estimadas em 2%.

Deve ser observado que, dependendo da corrente no OHT e do tempo de subida desta corrente, as tensões induzidas podem ser bastante altas. Se, eventualmente estas bobinas forem montadas no tokamak, este problema deve ser estudado mais detalhadamente.

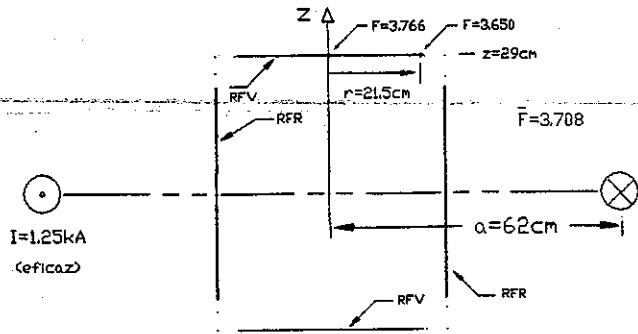


Figura 2: Posição da bobina RFV para calibração, na bobina SP.

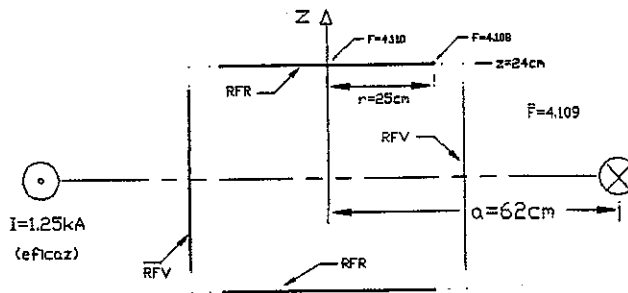


Figura 3: Posição da bobina RFR para calibração, na bobina SP.

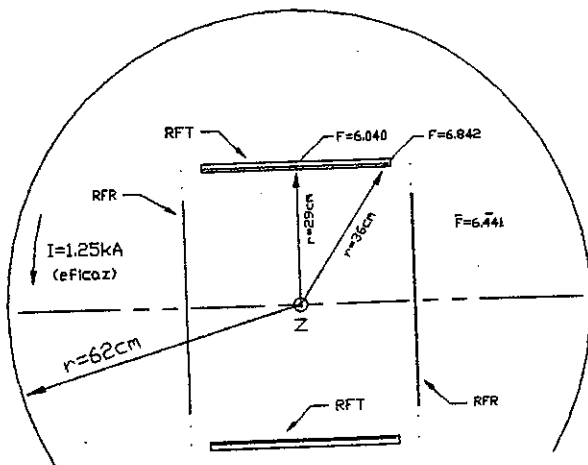


Figura 4: Posição da bobina RFT para calibração na bobina SF.

Tabela 1: Características das bobinas VC1, VC2 e VC3.

	VC1	VC2	VC3
Diâmetro	9.4 cm	15.5 cm	21.2 cm
Área A	$69.4 \times 10^{-4} m^2$	$188.7 \times 10^{-4} m^2$	$353.0 \times 10^{-4} m^2$
Resistência	4.12 Ω	5.64 Ω	3.34 Ω
N	20 espiras	16 espiras	7 espiras
$K = NA$	0.139 Vs/T	0.302 Vs/T	0.247 Vs/T

Referências

1. R. H. Huddlestone and S. Leonard, *Plasma Diagnostic Techniques*, Academic Press (1965).
2. W. Böttcher, *Measurement of Magnetic Field in Plasmas*, in W. Lochte-Holtgreven *Plasma Diagnostics*, North-Holland Publishing, Amsterdam (1968).
3. J. D. Ramboz, *Machinable Rogowski Coil, Design and Calibration*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 45, NO.2 (1996).
4. J. H. Vuolo, *Fundamentos da Teoria dos Erros, 2ª Edição*, Editora Edgard Blücher, São Paulo (1996).
5. L. Landau et E. Lifchitz, *Électrodynamique de Milieux Continus*, Éditions MIR, Moscou (1969).
6. M. R. Spiegel, *Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas*, Editora McGraw-Hill, São Paulo (1973).
7. V. S. Mukhovatov, V. D. Shafranov, Plasma Equilibrium in a Tokamak, *Nuclear Fusion* Vol. 11, p. 605 (1971).
8. A. Y. Ueta, Campo Vertical de Equilíbrio no Tokamak TBR, *Tese de Mestrado do IFUSP*, São Paulo (1985).