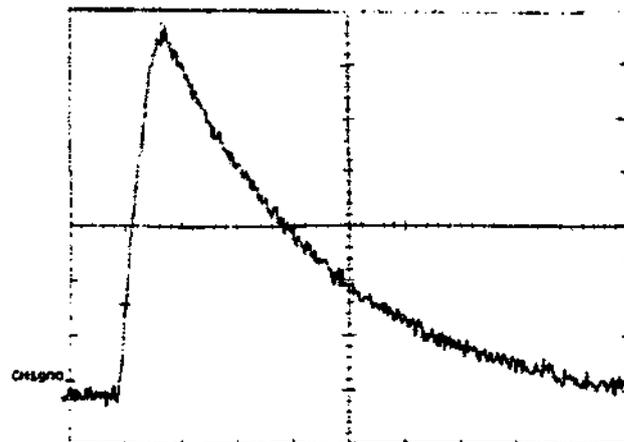


**Figura 1: bobina de Rogowski.**

O circuito de calibração por corrente alternada nada mais é do que um variac ligado à bobina de calibração em série com um resistor de prova. Já o circuito de calibração por corrente pulsada consiste num banco de capacitores que, quando disparado, produz um pulso de corrente com duração da ordem de milissegundos. Além dos resultados teóricos obtidos a partir do valor nominal dos componentes, também foram feitas previsões do funcionamento do circuito utilizando-se o alpicativo Pspice. Das simulações obteve-se tanto a forma quanto a intensidade e a duração do pulso produzido pelo circuito, que foram bem próximas do esperado (Fig. 2). O valor da constante de calibração para o protótipo da bobina de Rogowski com integrador, medido pelo sistema pulsado, é de  $k^{-1} = 10,01 \text{ A/mV}$



**Figura 2: forma do pulso de corrente produzido pelo circuito de calibração.**

1. GIACOIA, J. A. e DEL BOSCO, E., **Bobinas de Rogowski.**  
Relatório parcial, INPE, São José dos Campos, Dez/96.
2. GIACOIA, J. A. e DEL BOSCO, E., **Bobinas de Rogowski.**  
Relatório final do projeto, INPE, S. J. dos Campos, Jun/97.

*Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) - CNPq*

# **BOBINAS DE ROGOWSKI**

*Projeto vinculado à construção do ETE - Experimento Tokamak Esférico  
Laboratório Associado de Plasma - INPE*

## **RELATÓRIO FINAL DO PROJETO**

**Bolsista: JOÃO AUGUSTO GIACOIA**

**Orientador: EDSON DEL BOSCO**

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
<b>2. CONSTRUÇÃO DOS ELEMENTOS NECESSÁRIOS PARA A CALIBRAÇÃO DA BOBINA DE ROGOWSKI</b>	<b>3</b>
2.1. A BOBINA DE CALIBRAÇÃO	3
2.2. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO COM CORRENTE PULSADA	5
2.3. USUO GRADUADOR (DIFERENCIAL)	10
<b>3. CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO DA BOBINA DE ROGOWSKI</b>	<b>10</b>
3.1. CALIBRAÇÃO COM CORRENTE PULSADA	10
3.2. CALIBRAÇÃO COM CORRENTE ALTERNADA	11
<b>4. CONCLUSÃO DO TRABALHO</b>	<b>12</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>13</b>

## 1. Introdução

Este é o relatório final da bolsa de iniciação científica do PIBIC — CNPq, que teve por objetivo projetar, construir e calibrar uma *bobina de Rogowski* para medir a corrente pulsada de plasma produzida no tokamak ETE — Experimento Tokamak Esférico, do Laboratório Associado de Plasma do INPE.

*Tokamaks* são vasos toroidais cujo principal componente é a geração de uma corrente elétrica toroidal no gás ionizado confinado em seu interior, denominada *corrente de plasma* (ou *corrente toroidal*). Esta corrente pulsada possui valores bastante elevados. Para o caso do tokamak ETE deve-se alcançar aproximadamente  $450\text{ kA}$ . A mesma é responsável pelo aquecimento do plasma, por efeito Joule, e também para gerar um campo magnético na direção poloidal, que, juntamente com o campo toroidal, aplicado externamente, produz as linhas de campo helicoidais necessárias para confinar o plasma no tokamak.

Os tokamaks fazem parte de uma série de estudos aprofundados para a construção de reatores que sejam economicamente viáveis na produção de energia elétrica a partir de fusão nuclear, cujos recursos são praticamente inesgotáveis e cuja produção não ocasiona prejuízos para o meio-ambiente.

Na primeira etapa desta bolsa, foi projetado e construído um protótipo da bobina de Rogowski que será usada no tokamak (Giacoia e Del Bosco, 1996). Ele serviu para que fossem testados os circuitos de calibração, também projetados naquela ocasião. Na segunda e última etapa, construiu-se o circuito de calibração e realizou-se a calibração da bobina experimental, tanto com corrente pulsada quanto alternada, usando-se também um integrador diferencial. Esta fase dos trabalhos está descrita neste relatório.

## 2. Construção dos elementos necessários para a calibração da bobina de Rogowski

### 2.1. A bobina de calibração

A corrente que passa por uma bobina é proporcional ao número de espiras da mesma. Envolvendo todas as  $N$  espiras da bobina de calibração, a bobina de Rogowski estará medindo uma corrente  $N$  vezes maior que a produzida pelo circuito. Assim, sua resposta é melhor detectável. Convém frisar que a bobina de Rogowski que será usada no tokamak estará sujeita a correntes da ordem de  $10^5$  ampères.

Na construção da bobina de calibração foram usados os seguintes materiais:

- \* chapas de madeira para fazer o molde;
- \* fio de cobre com 3,8 mm de diâmetro;
- \* folha plástica auto-desmoldante mylar, com 0,18 mm de espessura;
- \* resina epóxi para encapsulamento.

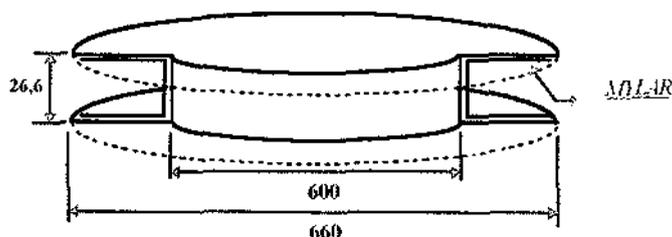


Figura 1: molde para a construção da bobina de calibração (valores em mm).

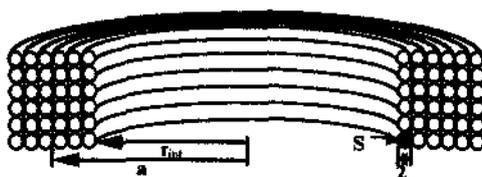


Figura 2: modelo esquemático da bobina de calibração.

Sobre um molde de madeira em forma de carretel (*fig. 1*), cujo sulco foi coberto com mylar, enrolou-se seis camadas de fio com seis voltas cada uma, totalizando 36 voltas de fio (*fig. 2*). Esse trabalho foi feito com o auxílio de uma bobinadeira (*fig. 3*). A cada camada enrolada sobrepunha-se uma camada de resina epóxi, com a finalidade de dar a resistência mecânica necessária quando da remoção do molde. A cobertura de mylar, por não se aderir à resina, facilitou essa remoção.

Às pontas do fio foram soldadas chapas de cobre perfuradas, que funcionam como terminais para a conexão elétrica da bobina ao circuito de alimentação.

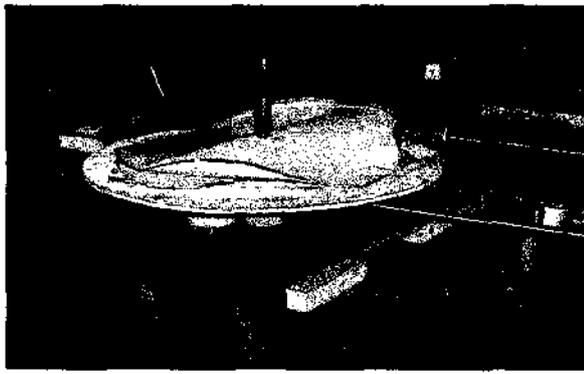


Figura 3: bobinadeira usada para o enrolamento da bobina de calibração.

O trabalho seguinte foi o encapsulamento geral da bobina. A bobina foi colocada numa forma de alumínio forrada de mylar, a qual foi preenchida com resina. Sêca a resina, o mylar foi facilmente removido, tendo-se a bobina pronta (fig. 4).

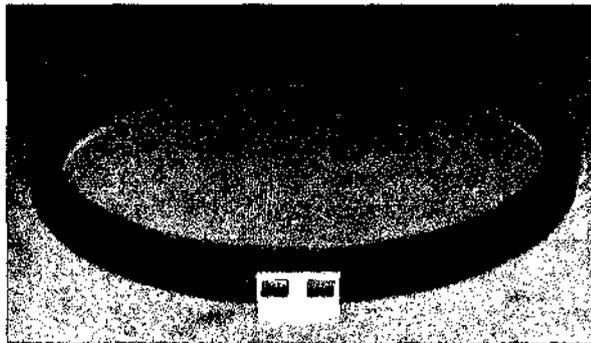


Figura 4: bobina de calibração ( $N = 36$  voltas) após encapsulamento.

As características dessa bobina estão na figura 2 e na tabela 1 (Giacioia e Del Bosco, 1996). Esta tabela foi construída a partir das seguintes equações:

$$L_{BC} = \mu_0 a N^2 \left\{ \ln\left(\frac{8a}{b}\right) - \frac{7}{4} + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \left[ \frac{1}{8} \ln\left(\frac{8a}{b}\right) + \frac{1}{24} \right] \right\}$$

Equação 1: indutância da bobina de calibração.

$$R_{BC} = \rho \frac{\ell}{S}$$

Equação 2: resistência da bobina de calibração.

$$Z_{BC} = \sqrt{R_{BC}^2 + (2\pi f)^2 L_{BC}^2}$$

Equação 3: impedância da bobina de calibração.

Tabela I: Valores teóricos das características da bobina de calibração.

GRANDEZA	VALOR
Resistividade do cobre	$\rho_{\text{cobre}} = 1,724 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
Raio do fio de cobre	$b = 1,9 \text{ mm}$
Seção transversal do fio	$S = \pi b^2 = 11,341 \text{ mm}^2$
Raio médio da bobina	$a = 300 + 6b = 311,40 \text{ mm}$
Comprimento total do fio	$\ell = 70,437 \text{ m}$
Indutância da bobina (cf. Eq. 1)	$L_{\text{BC}} = 2,753 \text{ mH}$
Resistência da bobina (cf. Eq. 2)	$R_{\text{BC}} = 107,07 \text{ m}\Omega$
Impedância da bobina a 60 Hz (cf. Eq. 3)	$Z_{\text{BC}} = 1,0434 \Omega$

Com um multímetro modelo LCR METER ELC-130 mediu-se os parâmetros da bobina. Foi levado em conta que a resistência do cabo do multímetro é de  $0,21 \Omega$ . Para medir a resistência, usou-se fundo de escala de  $2 \Omega$ . Para a indutância, usou-se fundo de  $2 \text{ mH}$ . Os resultados estão na *tabela II*, abaixo.

Tabela II: valores medidos das grandezas da bobina de calibração.

GRANDEZA	VALOR
Resistência ôhmica	$R = R_{\text{medido}} - R_{\text{cabo}} = 0,10 \Omega$
Indutância	$L = 1,712 \text{ mH}$
Impedância a 60 Hz	$Z = 0,653 \Omega$

Notar que o valor experimental da indutância da bobina foi muito diferente do esperado, fazendo com que outras grandezas ligadas a essa indutância — como o pico de corrente no circuito de calibração — tivessem resultados diferentes dos previstos.

## 2.2. Circuito de calibração com corrente pulsada

Este circuito consiste de um banco de capacitores (*fig. 5*) que é descarregado na bobina de calibração quando disparado. São quatro capacitores eletrolíticos de  $4500 \mu\text{F}$  e  $250\text{V}$  cada um, sendo dois conjuntos em paralelo de dois capacitores em série. Logo, o capacitor equivalente é de  $4500 \mu\text{F}$  e  $500\text{V}$ . O banco é alimentado por uma fonte de  $300\text{V}$  e  $0,2\text{A DC}$  através de uma resistência de carga de  $6600 \text{ ohms}$ . Por segurança, o circuito pode ser descarregado por um resistor de descarga de  $680 \text{ ohms}$  em série com uma chave ligada á terra.

O disparo é produzido por um circuito auxiliar que alimenta o *gate* do tiristor que interliga o banco e a bobina de calibração. A corrente no *gate* é de  $180\text{mA}$ . O tiristor pode conduzir correntes de até  $250\text{A}$ , mas nesse experimento foi tomado o cuidado de não ultrapassar  $200\text{A}$ .

Para a calibração definitiva da bobina de Rogowski do tokamak necessita-se medir com precisão a corrente na bobina de calibração. Para isso, deve-se colocar um resistor de filamento de níquel-cromo em um

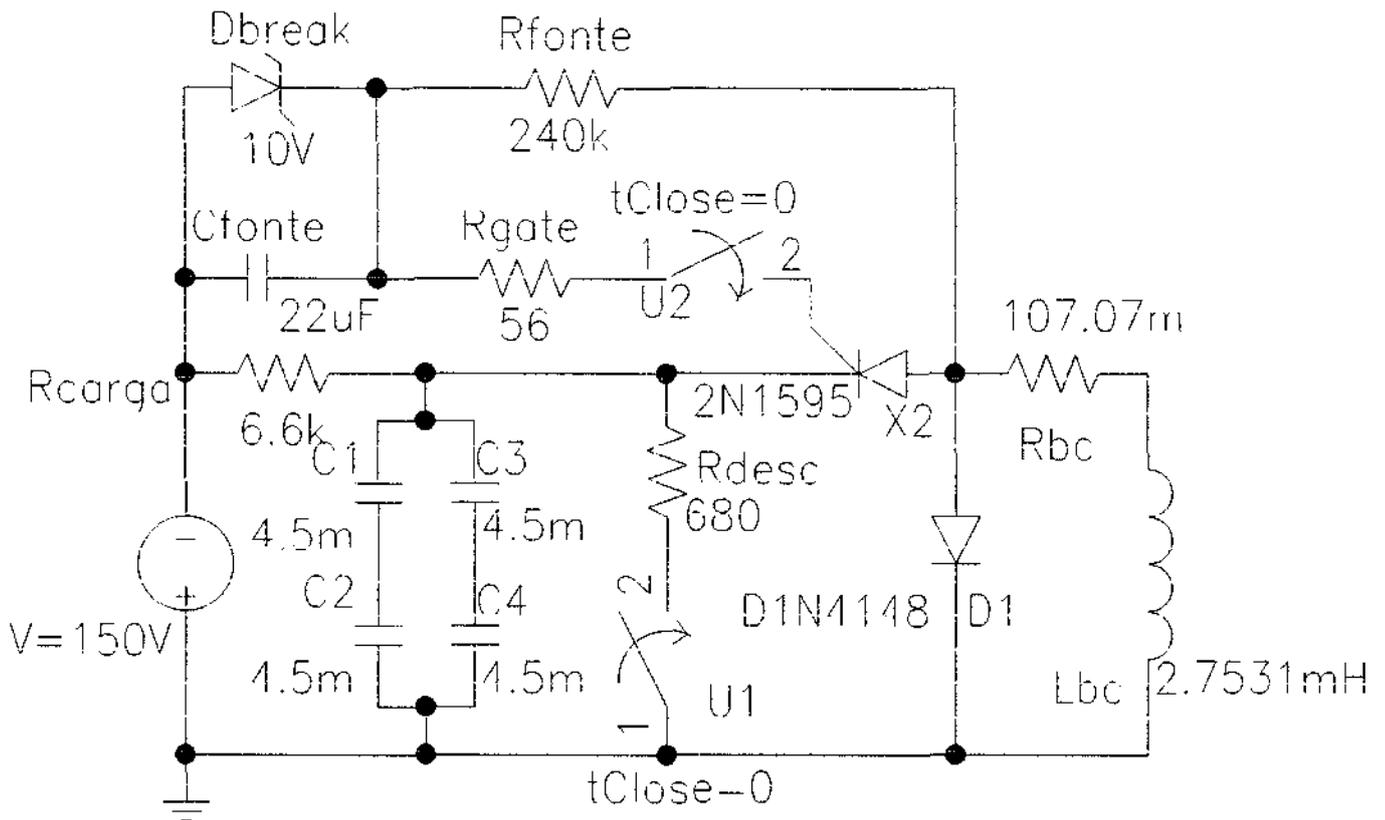


Figura 5: esquema do circuito de calibração por corrente pulsada.

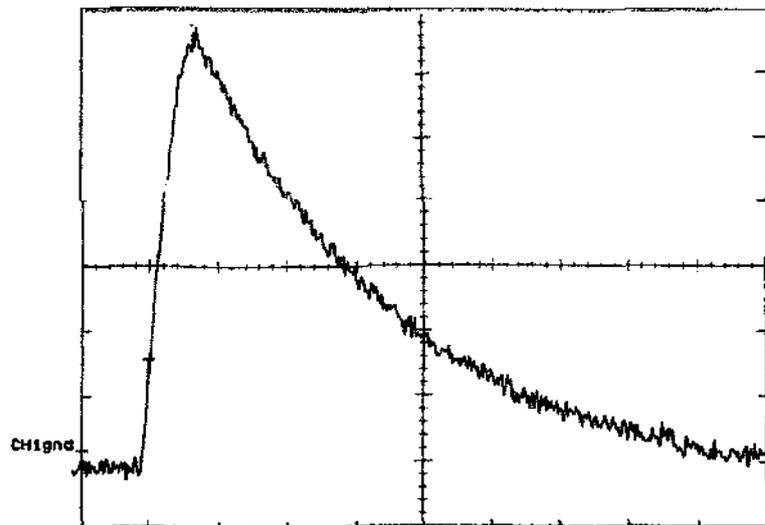
dos terminais da bobina de calibração. Isto foi feito; mas, até o momento, não houve condições de medir com exatidão o valor de sua resistência. Por isso, os valores adotados para corrente na bobina de calibração se referem a estimativas feitas a partir do valor calculado desse resistor. O resistor colocado em série com a bobina de calibração tem as seguintes características:

- \* comprimento do fio = 51,06 mm;
- \* área da seção do fio = 19,408 mm<sup>2</sup>;
- \* resistividade do níquel-cromo =  $1,0 \cdot 10^{-3} \Omega \text{mm}$ ;
- \* a resistência teórica do resistor é  $R_{NiCr} = 2,631 \text{ m}\Omega$ .

Usando-se um osciloscópio digital Tektronix e uma plotter, pôde-se observar o funcionamento do circuito e comparar com o resultado da simulação no aplicativo Pspice Evaluation Version 5.4. A figura 6 mostra o perfil temporal da corrente na bobina de calibração quando o banco foi carregado com 150 V. Este perfil foi medido no resistor de níquel-cromo.

Da figura obtida no osciloscópio, tem-se:

- \* tensão máxima no resistor de níquel-cromo = 340 mV;
- \* corrente máxima estimada na bobina = 129,23 A.



**Figura 6: evolução temporal da corrente na bobina de calibração, medida no resistor de níquel-cromo:  
CH1 = 50 mV/DIV; TIME = 5 ms/DIV.**

Na *figura 7* é apresentada uma fotografia do arranjo experimental montado para as medidas de calibração do protótipo da bobina de Rogowski do ETE.



**Figura 7: montagem do circuito de calibração do protótipo da bobina de Rogowski .**

A *figura 8* mostra o perfil temporal da corrente na bobina de calibração prevista teoricamente pelo aplicativo **Pspice**, obtida nas mesmas condições do pulso da *figura 6*; o código fonte do circuito encontra-se na página seguinte. Verifica-se uma boa concordância entre os perfis previsto e obtido. A diferença na magnitude deve-se à diferença entre os valores previsto e obtido para a indutância da bobina de calibração.

\*\*\*\* 06/15/97 14:03:33 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991)  
 \*\*\*\*\*

Circuito da BOBINA DE CALIBRACAO

```

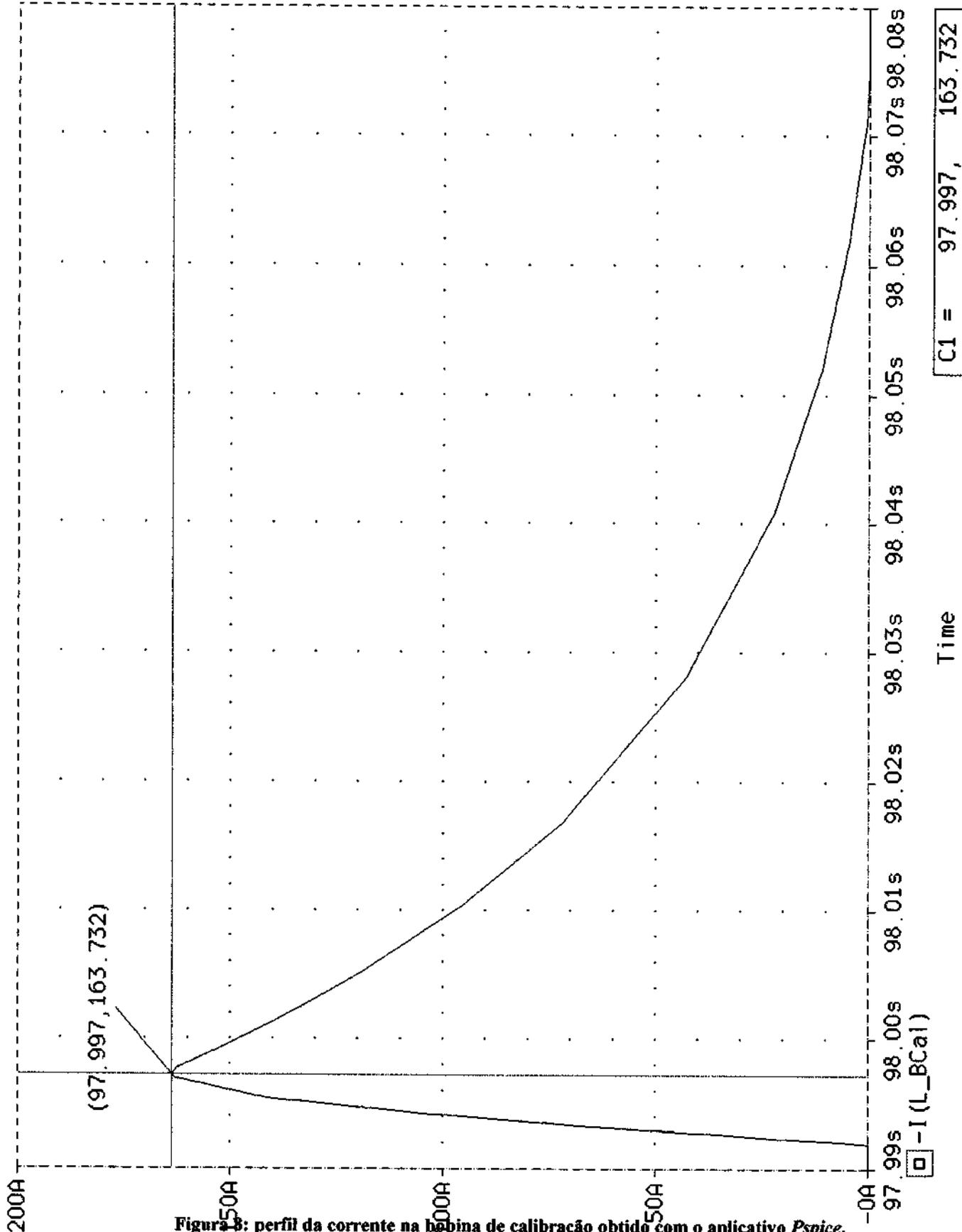
*****
*          BANCO2.CIR          *
*      Esquema do Circuito      *
*****
* Banco de Capacitores
V_Char  0  2  DC 150
R_Char  2  1  6.6k
C_Bank  1  0  4.5m
* Disparo do Banco
W_Displ 1  9  V_Wdsp TIRISTOR
V_Wdsp  8  0  DC 0
V_Displ 7  0  DC 10
R_Displ 7  6  50
S_Displ 6  8  10 0 CHAVE
V_Swdp 10 0  PWL(0 0 97.99 0 98 1 98.33 1 98.34 0)
D_Displ 5  9  DIODO
D_Load  5  0  DIODO
* Descarga do Banco
R_Desc  1  3  680
S_Desc  0  3  11 0 CHAVE
V_Swdc 11 0  PWL(0 0 119.99 0 120 1)
* Bobina de Calibracao
R_BCal  5  4  107.07m
L_BCal  4  0  2.7531m
* Configuracao para Analise
.OPT RELTOL=.0001 TRTOL=20 NOPAGE NOMOD
.MODEL      DIODO      D(IS=1E-15 RS=0 TT=0 CJO=0 VJ=1)
.MODEL      CHAVE      VSWITCH(Ron=10E-6 Roff=1E6 Von=0.5 Voff=0)
.MODEL      TIRISTOR   ISWITCH(Ron=10E-6 Roff=1E6 Ion=0.1 Ioff=0)
.TRAN 0.1 150 UIC
.PROBE
.END

```

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 4.61

□



C1 = 97.997, 163.732  
C2 = 97.990, 142.170u  
dif= 7.1945m, 163.732

Figura 8: perfil da corrente na bobina de calibraco obtido com o aplicativo Pspice.

### 2.3. Integrador diferencial

Já que o sinal de saída da bobina de Rogowski é proporcional à derivada da corrente medida, torna-se necessário o uso de um integrador, para que o sinal obtido seja proporcional à corrente que se deseja medir. A figura 9 mostra o esquema do circuito integrador utilizado com a bobina de Rogowski (Del Bosco, 1989).

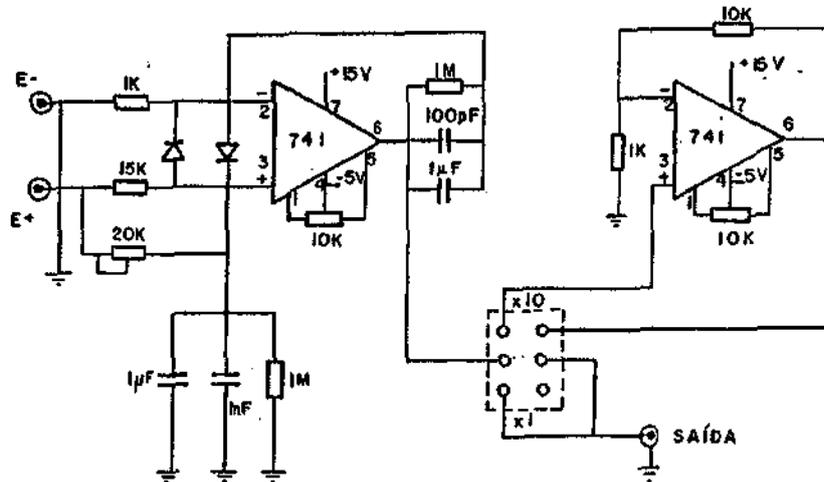


Figura 9: circuito do integrador diferencial.

Esse integrador é apropriado para pulsos com a duração da ordem de dezenas de milisegundos. A saída do conjunto *integrador-bobina de Rogowski* é dada por:

$$V_{RI} = \frac{\mu_0 AN}{2\pi r_0} \frac{I_{BC}}{RC}$$

Equação 4: resposta da bobina de Rogowski com integrador.

Mas como  $A = 41,282 \text{ mm}^2$ ,  $N = 507$ ,  $r_0 = 52,5625 \text{ mm}$  (Giacoina e Del Bosco, 1996) e, neste integrador,  $RC = 1 \text{ ms}$ , tem-se que o valor esperado para a constante de calibração com integrador é:

$$\frac{V_{RI}}{I_{BC}} = K_I = 79,639 \mu\text{V}/\text{A} \Leftrightarrow K_I^{-1} = 12,557 \text{ A}/\text{mV}$$

## 3. Calibração do protótipo da bobina de Rogowski

### 3.1. Calibração com corrente pulsada

Para a calibração com corrente pulsada utilizou-se o osciloscópio digital TED-7603, ao qual foi conectado o conjunto *integrador-bobina de Rogowski*. Carregou-se o banco até que a tensão nos capacitores chegasse a 100V. Então, foi efetuado o disparo, obtendo-se os resultados contidos na tabela III.

Tabela III: Resultados da calibração com corrente pulsada.

GRANDEZA	VALOR
Tensão no resistor de Ni-Cr	$V_{NiCr} = 275 \text{ mV}$
Corrente no resistor de Ni-Cr	$I_{NiCr} = 104,53 \text{ A}$
Corrente na bobina de calibração	$I_{BC} = 3763 \text{ A}$
Tensão na saída do integrador (com e sem ganho)	$V_{RI} = 376 \text{ mV}$ $V_{RI(X10)} = 4,08 \text{ V}$
Constante de calibração da bobina de Rogowski com integrador	$K_i = 99,921 \mu\text{V/A} \Leftrightarrow K_i^{-1} = 10,008 \text{ A/mV}$ (sem ganho) $K_i = 1,084 \text{ mV/A} \Leftrightarrow K_i^{-1} = 0,922 \text{ A/mV}$ (com ganho)

### 3.2. Calibração com corrente alternada

Para a calibração com corrente pulsada utilizou-se um multímetro tipo alicate ET-3900 e um variac de entrada de 220V e saída 0—240V, 12,5A. Entretanto, o variac foi alimentado com tensão de 110V AC (60 Hz). Além desse equipamento, ainda foram utilizados o integrador, o osciloscópio digital e o plotter, descritos anteriormente.

Inicialmente, checkou-se a resposta da bobina sem o integrador. Para um sinal de 60 Hz, o resultado esperado é o seguinte:

$$V_{Rog} = \frac{\mu_0 AN}{2\pi r_0} 2\pi f I_{BC} \Leftrightarrow \frac{V_{Rog}}{I_{BC}} = K = 30,023 \mu\text{V/A} \Leftrightarrow K^{-1} = 33,307 \text{ A/mV}$$

Ligou-se o variac na bobina de calibração e com o multímetro verificou-se a corrente na mesma. Nos canais do osciloscópio colocou-se o *signal de entrada na bobina de calibração e o de saída da bobina de Rogowski*. A *figura 11* mostra os sinais obtidos sem integrador. A *tabela IV* traz detalhes dos resultados.

Tabela IV: Resultados da calibração com corrente alternada sem integrador.

GRANDEZA	VALOR
Corrente medida pelo multímetro	$I_{rms} = 352 \text{ A}$
Corrente pico-a-pico na bobina de calibração	$I_{BC} = 2 \cdot I_{rms} \cdot \sqrt{2} = 995,61 \text{ A}$
Tensão pico-a-pico na saída da bobina de Rogowski	$V_{Rog} = 32,7 \text{ mV}$
Constante de calibração da bobina de Rogowski sem integrador	$K = 32,844 \mu\text{V/A} \Leftrightarrow$ $\Leftrightarrow K^{-1} = 30,447 \text{ A/mV}$

Na *figura 10*, temos as curvas sobtidas com a plotter na calibração com corrente alternada sem integrador. Reparar que o sinal de saída da bobina de Rogowski é a derivada do sinal de entrada na bobina de calibração.

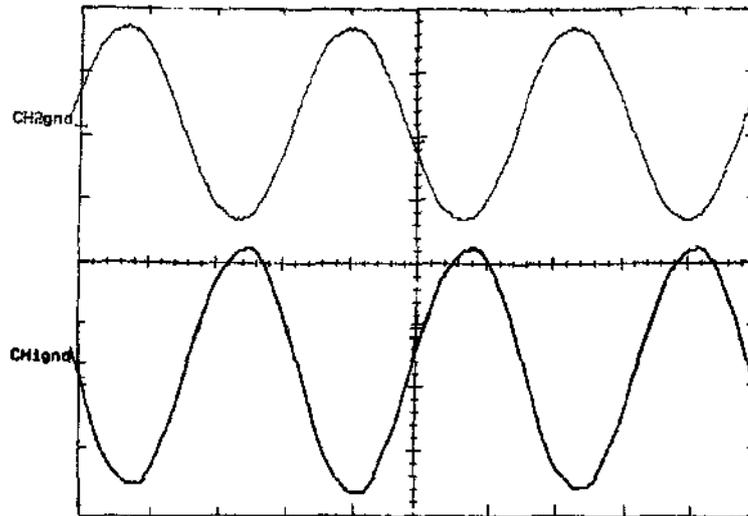


Figura 10: curvas obtidas na calibração com corrente alternada sem integrador:

CH 1 = sinal de entrada na bobina de calibração = 5 V/DIV;

CH 2 = sinal de saída da bobina de Rogowski = 10 mV/DIV; TIME = 5 ms/DIV

Em seguida, fez-se a calibração com corrente alternada (60 Hz) e com o uso do integrador. Acrescentou-se ao circuito de calibração *quatro resistores de 100Ω e 300W em paralelo*, tendo-se uma resistência equivalente de *25Ω em série* no circuito. Quando a tensão nesses resistores chegou a *51V*, o multímetro media *74A* nas 36 espiras da bobina. Na *tabela V* estão os resultados obtidos.

Tabela V: Resultados da calibração com corrente alternada e com integrador.

GRANDEZA	VALOR
Corrente medida pelo multímetro	$I_{rms} = 74 \text{ A}$
Corrente pico-a-pico na bobina de calibração	$I_{BC} = 2 \cdot I_{rms} \cdot \sqrt{2} = 209,30 \text{ A}$
Tensão pico-a-pico na saída do integrador (com e sem ganho)	$V_{Ri} = 17,6 \text{ mV}$ $V_{Ri(X10)} = 192 \text{ mV}$
Constante de calibração da bobina de Rogowski com integrador	$K_i = 84,088 \mu\text{V/A} \Leftrightarrow K_i^{-1} = 11,892 \text{ A/mV}$ (sem ganho) $K_i = 0,9177 \text{ mV/A} \Leftrightarrow K_i^{-1} = 1,090 \text{ A/mV}$ (com ganho)

#### 4. Conclusão do trabalho

Inicialmente, uma observação: não foi implementada a blindagem de alumínio na bobina de Rogowski pois isso impossibilitaria sua calibração na bobina construída. Assim, sua calibração com blindagem deverá ser feita de outra forma.

Lamentavelmente, a calibração com corrente pulsada não atingiu resultados precisos. Isso ocorreu pela falta de um resistor adequado para fazer a medida da corrente na bobina de calibração. Já a calibração com corrente alternada teve resultados próximos dos esperados, tanto com quanto sem o integrador.

Mesmo assim, os trabalhos realizados serviram de teste para as futuras atividades em torno do projeto, da confecção e da calibração da bobina de Rogowski a ser instalada no tokamak. Fica de proveitoso os circuitos necessários para a calibração de novas bobinas já montados e testados.

Com bom embasamento teórico e muitas horas de prática, conseguiu-se atingir os objetivos estabelecidos no início dos trabalhos, a menos da construção da bobina de Rogowski a ser instalada no tokamak ETE, já que esta está atrelada a detalhes de projeto do mesmo e deverá ocorrer concomitantemente com a construção deste.

## **5. Referências bibliográficas**

1. GIACOIA, J. A. e DEL BOSCO, E., **Bobinas de Rogowski**. Relatório de pesquisas, INPE, São José dos Campos, Dezembro de 1996.
2. DEL BOSCO, E. , **Centrifuga de plasmacom descarga em arco no vácuo aplicada a separação de isótopos estáveis**. Tese de doutorado, INPE, São José dos Campos, 1989.