

Projeto Integrado de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) - CNPq

# **BOBINAS DE ROGOWSKI**

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

**Bolsista: JOÃO AUGUSTO GIACOIA**

**Orientador: EDSON DEL BOSCO**

1997

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
<b>2. SONDAS MAGNÉTICAS</b>	<b>2</b>
<b>3. BOBINAS DE ROGOWSKI</b>	<b>3</b>
3.1. TEMPO DE RESPOSTA DA BOBINA DE ROGOWSKI.	4
3.2. BLINDAGEM ELETROSTÁTICA.	5
<b>4. CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DA BOBINA DE ROGOWSKI</b>	<b>6</b>
4.1. TEMPO DE RESPOSTA DA BOBINA.	6
4.2. BLINDAGEM DE ALUMÍNIO.	7
<b>5. CALIBRAÇÃO DA BOBINA DE ROGOWSKI</b>	<b>7</b>
5.1. BOBINA DE CALIBRAÇÃO.	8
5.2. CALIBRAÇÃO COM CORRENTE ALTERNADA.	9
5.3. CALIBRAÇÃO COM CORRENTE PULSADA.	9
<b>6. CONCLUSÃO</b>	<b>13</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>13</b>

## 1. Introdução

A fusão nuclear deve tornar-se, dentro de alguns anos, uma das principais fontes de energia elétrica. Seus recursos são praticamente inesgotáveis e sua produção não ocasiona prejuízos para o meio-ambiente. Entretanto, ainda não se conseguiu produzir energia a partir de fusão nuclear de um modo economicamente viável, sendo necessários estudos aprofundados para a construção de reatores compactos e eficientes.

Tais estudos incluem a construção de *tokamaks*, que são vasos toroidais onde se mantém gases ionizados confinados por campos magnéticos sob altas pressões e temperaturas. No Laboratório Associado de Plasma do INPE encontra-se em construção o ETE - Experimento Tokamak Esférico. O tema desta bolsa de iniciação científica está diretamente ligado à construção do ETE.

Acontece que dentro de um tokamak os gases estão em condições de temperatura e pressão tais que passam para o estado de plasma, ou seja, de gás ionizado. Um dos principais componentes que caracterizam um tokamak é a geração de uma corrente elétrica toroidal no gás ionizado, 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 kA. Esta corrente 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. Esta bolsa tem por objetivo projetar, construir e calibrar uma *bobina de Rogowski* para medir a corrente de plasma pulsada produzida no tokamak ETE.

## 2. Sondas magnéticas

Uma sonda magnética é essencialmente um enrolamento elétrico (tipo solenóide) usado para medir campos magnéticos com variação temporal [1]. Espera-se de uma sonda:

- boa sensibilidade;
- tempo de resposta compatível com o experimento; e
- pouca perturbação do sistema.

Mas isso implica em alguns compromissos que devem ser cumpridos para evitar que esses três méritos entrem em conflito entre si.

O sinal de saída de uma sonda (antes de ser integrado) é:  $V = nA \frac{dB}{dt}$ , onde  $n$  é o número de voltas de fio por unidade de comprimento ( $n = N/\ell$ ),  $A$  é a área da seção transversal da mesma e  $B(t)$  é a intensidade do campo magnético (que é função do tempo).

Já o tempo de resposta é dado por  $T_R = L/R_0$ , onde  $L$  é a indutância da sonda e  $R_0$  sua resistência interna. A indutância  $L$  pode ser dada por  $L = FN^2 r$ , sendo que  $F$  depende da relação *raio/comprimento* da sonda.

Quanto menor a área de seção da sonda, menor será a perturbação do sistema, mas perde-se em sensibilidade. Para melhorá-la, aumenta-se o número de voltas, o que acaba prejudicando o tempo de resposta por causa do aumento da indutância. O aumento de  $R_0$  não pode ser feito incondicionalmente pois afetaria todos os parâmetros já discutidos. A otimização desses parâmetros merece um estudo detalhado e será abordada posteriormente.

### 3. Bobinas de Rogowski

Basicamente, uma bobina de Rogowski é um tipo particular de sonda magnética [2,3].

Medidas de corrente podem ser feitas tanto por resistências de *shunts* quanto por transformadores de corrente, cujo secundário é uma bobina toroidal que envolve a corrente a ser medida.

Basicamente, esta é a forma de uma bobina de Rogowski: uma bobina solenoidal na forma de um laço envolvendo a corrente que se quer medir (Fig. 1).

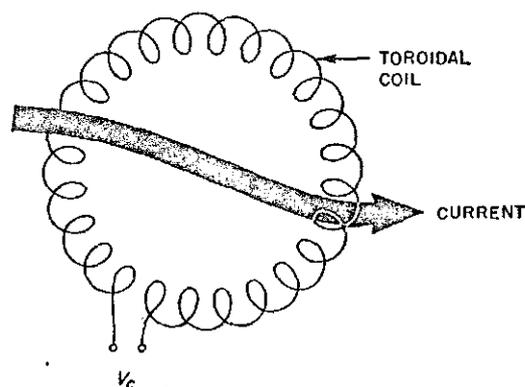


Fig. 1: Bobina de Rogowski.

A voltagem induzida entre os terminais da bobina é  $V = N \frac{d\phi}{dt}$ , onde  $\phi = AB = A \frac{\mu_0 I(t)}{2\pi r_0}$ ,

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{Wb}{A.m}$ ,  $r_0$  é o raio da bobina e  $I(t)$  a corrente a ser medida.

Portanto, o sinal de saída da bobina é

$$V = \frac{\mu_0 AN}{2\pi r_0} \frac{dI}{dt}(t) \quad (\text{Eq. 1}),$$

sendo que a constante  $\mu_0 AN$  pode ser determinada experimentalmente.

Um integrador eletrônico transforma essa resposta para

$$V = \frac{\mu_0 AN}{2\pi r_0} \frac{I(t)}{RC} \quad (\text{Eq. 2}),$$

devendo-se minimizar  $L/R$  e maximizar  $RC$  para diminuir os erros de integração.

Normalmente é necessário envolver a bobina de Rogowski com uma blindagem metálica. A blindagem não impede a penetração de campo magnético, mas a capacitância distribuída  $C_d$  que surge devida à blindagem pode ocasionar na resposta um atraso de  $\sqrt{LC_d}$ . Condutores ligados à bobina produzem efeitos semelhantes a esse por causa de sua indutância e da capacitância concentrada nos terminais da bobina.

### 3.1. Tempo de resposta da Bobina de Rogowski.

Já foi visto que

$$T_{Resp} = \frac{L_{Rog}}{R_{Rog}} \quad (\text{Eq. 3}).$$

A indutância pode ser expressa por [4]

$$L_{Rog} = \frac{\mu_0 AN^2}{2\pi r_0} \quad (\text{Eq. 4}),$$

sendo que  $r_0$  é tal que  $\phi = N \frac{\mu_0 i}{2\pi r_0} A = N \iint_A B(r) dA \Leftrightarrow$

$$r_0 = \left( \frac{d/2}{\sqrt{r_{ext}} + \sqrt{r_{int}}} \right)^2 \quad (\text{Eq. 5}),$$

onde  $\phi$  é o fluxo magnético numa seção da bobina,  $i$  a corrente que passa pela mesma,  $d$  é o diâmetro das espiras da bobina e  $r_{int}$  e  $r_{ext}$  seus raios interno e externo (conforme Fig. 2).

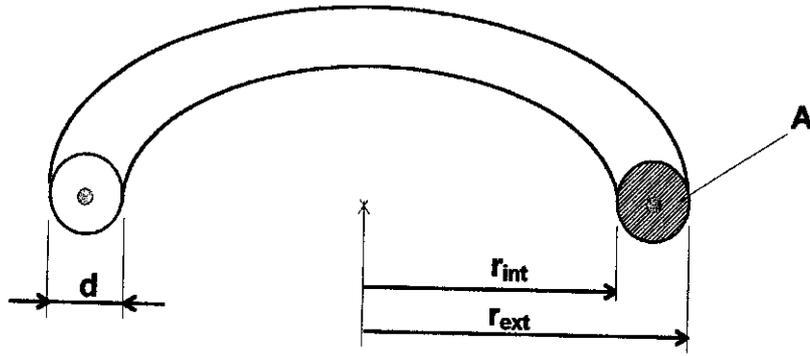


Fig. 2: Esquema de uma bobina de Rogowski (em corte).

Dado que a saída da bobina é  $V = \frac{\mu_0 AN}{2\pi r_0} \frac{dI}{dt}$ , válido para  $r_0 \gg d$ , para se obter um bom sinal é recomendável maximizar  $N.A/r_0$  sem aumentar muito o número de voltas  $N$ , pois aumentaria a indutância e, com ela, o tempo de resposta. Porém, o aumento de  $A$  e a diminuição de  $r_0$  devem ser feitos respeitando-se a condição  $r_0 \gg d$ , pois  $A = \pi(d^2/4)$ .

O tempo de resposta depende também da resistência da bobina, cuja expressão é

$$\boxed{R_{Rog} = \rho_\ell \pi d N} \quad (\text{Eq. 6}),$$

onde  $\rho_\ell$  é a resistência por unidade de comprimento do fio.

A sensibilidade da bobina é proporcional a:  $s = \frac{\mu_0 AN}{2\pi r_0} = \frac{L_{Rog}}{N} \Rightarrow s = \rho_\ell \pi d \frac{L_{Rog}}{R_{Rog}} \Rightarrow$

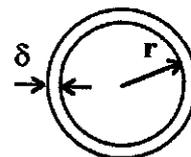
$$\boxed{s = \rho_\ell \pi d T_{Resp}} \quad (\text{Eq. 7}).$$

Fixando-se um valor máximo aceitável para  $T_{Resp}$ , aumenta-se  $d$  o quanto for possível, de modo que não ocorram as incompatibilidades já comentadas.

### 3.2. Blindagem eletrostática.

Sua função é isolar a bobina de campos eletrostáticos, os quais são produto da variação de  $B$ . Entretanto, essa blindagem acaba dificultando também a penetração de  $B$ , introduzindo no sinal um atraso equivalente a:

$$\boxed{\tau = \frac{\mu_0 r \sigma \delta}{2}} \quad (\text{Eq. 8}),$$



onde  $r$  é o raio da blindagem,  $\delta$  a sua espessura e  $\sigma$  a condutividade elétrica de seu material.

#### 4. Construção de um protótipo da bobina de Rogowski

Deseja-se construir uma bobina de 98 mm de diâmetro interno, conforme mostrado na Fig. 3. O material disponível é:

- cabo coaxial RG 213, do qual será aproveitada apenas a parte interna, que consta de um condutor de cobre revestido por uma camada de nylon (onde o fio de cobre será enrolado);
- fio de cobre bitola AWG 23.

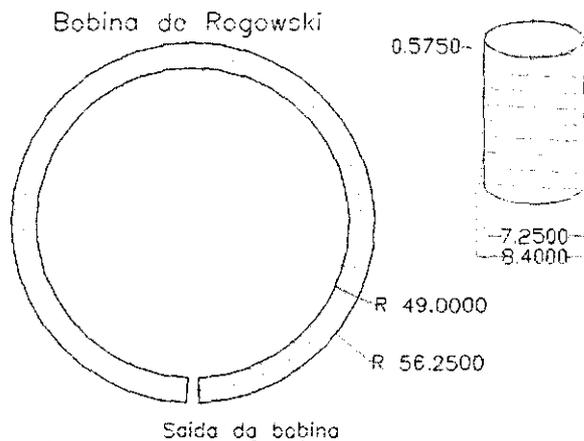


Fig.3: Aspecto da bobina de Rogowski experimental.

Com isso, torna-se necessário calcular alguns parâmetros para que se tenha idéia da quantidade de material a ser utilizado e das características da bobina.

TABELA 1: Dimensões dos elementos da bobina.

Cabo		Fio de cobre	
Diâmetro	Comprimento	Diâmetro	Número de voltas
$D = 7,25\text{mm}$	$\ell = (98 + D/2)\pi \approx 319,26\text{mm}$	$d = 0,575\text{mm}$	$N = \ell/d \approx 555\text{ voltas}$

TABELA 2: Dimensões da bobina.

Seção transversal	Raios		
	Interno	Externo	da Bobina
$A = \pi(D/2)^2 = 41,3\text{mm}^2$	$r_{int} = 49,0\text{mm}$	$r_{ext} = 56,25\text{mm}$	$r_0 = 52,5625\text{mm}$ (cf. Eq. 5)

##### 4.1. Tempo de resposta da bobina.

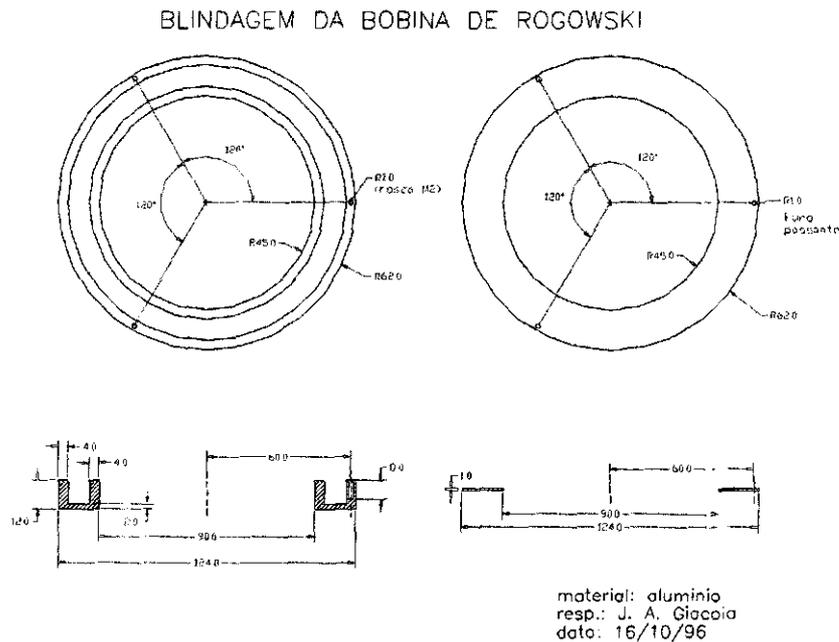
Na tabela a seguir constam as grandezas necessárias para o cálculo e o tempo de resposta já calculado.

**TABELA 3: Cálculo do tempo de resposta da bobina de Rogowski.**

Grandeza	Valor
Indutância da bobina (cf. Eq. 4)	$L_{Rog} = 48,4 \mu H$
Resistência do fio de cobre por metro	$\rho_c = 6,639 \cdot 10^{-2} \Omega/m$
Resistência da bobina (cf. Eq. 6)	$R_{Rog} = 0,84 \Omega$
Tempo de resposta da bobina (cf. Eq. 3)	$T_{Resp} = 58 \mu s$

#### 4.2. Blindagem de alumínio.

A bobina, depois de pronta, será colocada no interior de uma blindagem feita de alumínio (Fig. 4) e fixada com resina epóxi. A saída da bobina será feita por uma conexão do tipo BNC fixada à blindagem.



**Fig. 4: Blindagem de alumínio para a bobina de Rogowski.**

Conforme a Eq. 8, a blindagem ocasiona um atraso na resposta da bobina. A seguir, o cálculo desse atraso.

**TABELA 4: Dados para o cálculo do atraso na resposta da bobina.**

Grandeza	Valor
Condutividade elétrica do alumínio	$\sigma = 3,5 \cdot 10^7 A/V$
Espessura da blindagem	$\delta = 1,0 mm$
Raio interno da blindagem	$r = 58,0 mm$
Atraso na resposta da bobina (cf. Eq. 8)	$\tau = 1,27 ms$

#### 5. Calibração da bobina de Rogowski

A calibração da bobina pode ser feita de duas formas [5]:

- usando-se um *variac* ligado à rede elétrica, ou seja, com uma corrente alternada; ou
- montando-se um banco de capacitores, cuja descarga produza uma corrente pulsada.

A segunda alternativa reproduz melhor as condições em que a bobina será aplicada no tokamak.

### 5.1. Bobina de calibração.

A corrente que passa por uma bobina é proporcional ao número de espiras da mesma. Se a bobina de Rogowski envolver todas as  $M$  espiras da bobina de calibração, estará medindo uma corrente  $M$  vezes maior do que a que passa pelo circuito. Assim, sua resposta é mais intensa e mais fácil de ser detectada. Além disso, a bobina de Rogowski que será usada no tokamak estará sujeita a correntes da ordem de  $10^5$  ampères.

Para construir a bobina de calibração, partiu-se de um molde de 60 cm de diâmetro; logo, o raio interno da bobina é de 30 cm. Além disso, foram usados os seguintes materiais:

- fio de cobre com 3,8 mm de diâmetro;
- milar com 0,18 mm de espessura.

Essa bobina tem  $M = 36$  espiras, sendo seis enrolamentos de seis espiras cada um, sobrepostos e separados por uma folha de milar. As características dessa bobina estão na Fig. 4 e na Tabela 5.

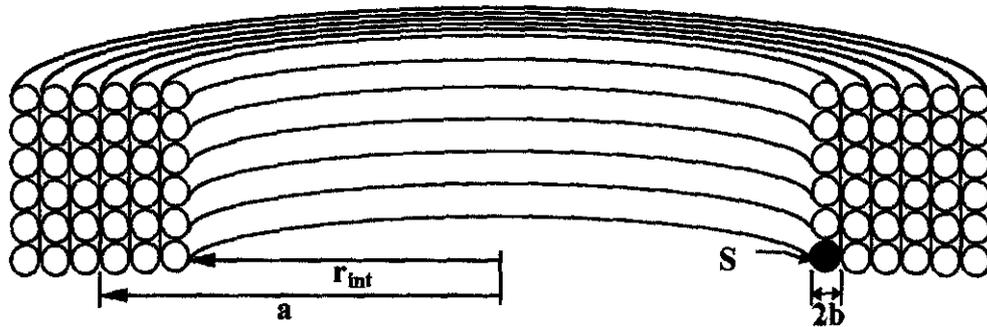


Fig. 5: Medidas da bobina de calibração.

Sua indutância é dada por

$$L_{BC} = \mu_0 a N^2 \left\{ \ln\left(\frac{8a}{b}\right) - \frac{7}{4} + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \left[ \frac{1}{8} \ln\left(\frac{8a}{b}\right) + \frac{1}{24} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 9}).$$

Já sua resistência ôhmica é

$$R_{BC} = \rho \frac{\ell}{S} \quad (\text{Eq. 10}),$$

onde  $\ell = 72\pi a$  é o comprimento do fio.

TABELA 5: Características da bobina de calibração.

Grandeza	Valor
Resistividade do cobre	$\rho_{\text{cobre}} = 1,724 \cdot 10^{-8} \Omega m$
Raio do fio de cobre	$b = 0,0019 m$
Seção transversal do fio	$S = \pi b^2 = 1,134 \cdot 10^{-5} m^2$
Raio médio da bobina	$a = 0,3 + 6b + 2,5 \cdot 1,8 \cdot 10^{-4}$ $= 0,31185 m$
Comprimento total do fio	$\ell = 70,54 m$
Indutância da bobina (cf. Eq. 9)	$L_{BC} = 2,76 mH$
Resistência da bobina (cf. Eq. 10)	$R_{BC} = 0,107 \Omega$

### 5.2. Calibração com corrente alternada.

O variac alimentará uma bobina de calibração com 36 espiras, por isso a corrente medida pela bobina de Rogowski será 36 vezes maior que a corrente fornecida pelo variac. Sendo do tipo  $I(t) = I_0 \text{sen}(\varphi_0 + \omega t)$ , essa corrente vai induzir no terminal da bobina uma tensão dada por  $V = 36 \frac{\mu_0 AN}{2\pi r_0} \omega I_0 \text{sen}(\varphi_0 + \omega t)$ , conforme a Eq. 1. Logo, o pico do sinal vale  $V_{\text{Pico}} = 36 \frac{\mu_0 AN}{2\pi r_0} \omega I_0$ . Mas sabe-se de antemão que  $\omega = 120\pi \text{ Hz}$ . Portanto,  $V_{\text{Pico}} = 1,18 \cdot 10^{-3} I_0$ .

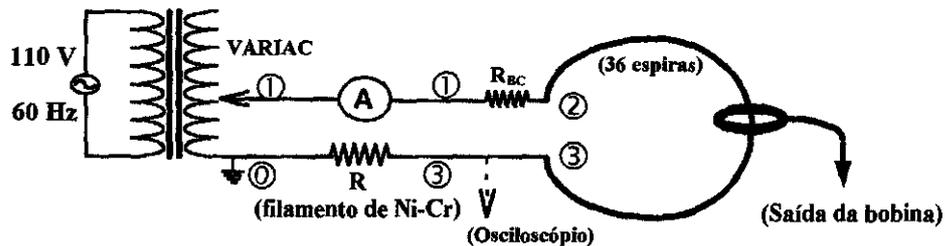


Fig. 6: Esquema do circuito de calibração com corrente alternada.

A resistência do filamento de Ni-Cr pode ser determinada por Ponte de Wheatstone.

Dispõe-se de dois variacs: um que fornece  $I_0 = 12 A$  e outro com  $I_0 = 30 A$ . O pico do sinal da bobina em cada caso é:

- para  $I_0 = 12 A$ , tem-se  $V_{\text{pico}} = 14,2 mV$ ;
- para  $I_0 = 30 A$ , tem-se  $V_{\text{pico}} = 35,5 mV$ .

Apesar de pequeno, esses sinais são aceitáveis para os padrões da experiência.

### 5.3. Calibração com corrente pulsada.

Esse tipo de calibração vai exigir que se construa um pulsador, banco de capacitores cujo disparo consiste em pulsos de corrente (Fig. 7).

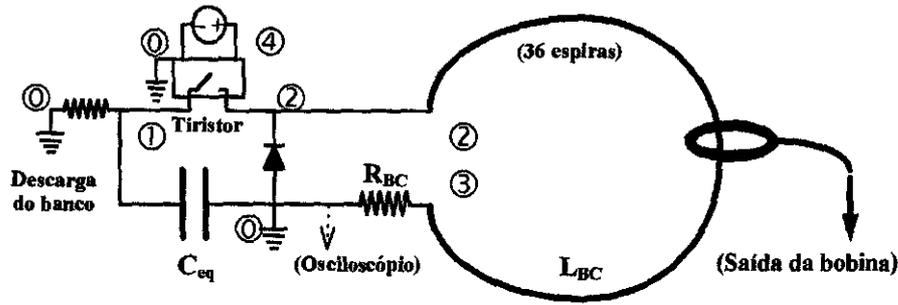


Fig. 7: Banco de capacitores e circuito pulsador.

O banco possui quatro capacitores de  $4500\mu\text{F}$  em série dois a dois, em dois ramos paralelos. Portanto,  $C_{eq} = 4500\mu\text{F}$ . Ele é alimentado por uma fonte de  $300\text{ V}$ . Para que o banco seja carregado em um minuto deve-se ter  $R_C C = 60\text{ s}$ , ou seja,  $R_C = 13,3\text{ k}\Omega$ . A corrente em  $R_C$  é  $i_{carga} = 22,5\text{ mA}$  e a potência  $P_{carga} = 6,75\text{ W}$ .

A energia acumulada no banco é  $U_C = \frac{1}{2}CV^2$ . Se toda essa energia fosse transferida para a bobina de calibração, ela seria equivalente a  $U_{BC} = \frac{1}{2}L_{BC}I^2$ . Portanto, a corrente máxima que atravessará o circuito será:  $\frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}L_{BC}I_{max}^2 \Leftrightarrow I_{max} = V\sqrt{\frac{C}{L_{BC}}} \Leftrightarrow I_{max} = 383,2\text{ A}$ .

Banco e bobina de calibração funcionam como um circuito LRC. O tiristor faz com que se alternem os regimes de carga e descarga do banco, gerando os pulsos de corrente. Cada pulso tem duas fases: subida e descida. A duração de cada uma das fases é a seguinte:

• **SUBIDA:** 
$$\tau_{Subida} = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{\pi}{2\sqrt{\frac{1}{L_{BC}C} - \left(\frac{R_{BC}}{2L_{BC}}\right)^2}} \Leftrightarrow \tau_{Subida} = 5,547\text{ ms}$$

• **DESCIDA:** 
$$\tau_{Descida} = \frac{L_{BC}}{R_{BC}} \Leftrightarrow \tau_{Descida} = 25,719\text{ ms}$$

Assim, a duração de um pulso é  $\tau = \tau_1 + \tau_2 = 31,266\text{ ms}$ . Este tempo é próximo ao tempo do pulso da corrente no tokamak, que fica em torno de  $20\text{ ms}$ .

Esse circuito foi simulado utilizando-se o aplicativo *Pspice*. Os resultados da simulação estão a seguir.

\*\*\*\* 01/11/97 17:02:23 \*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991)

Circuito do BANCO DE CAPACITORES

\*\*\*\* CIRCUIT DESCRIPTION

\*\*\*\*\*

\* banco.cir \*

\* Esquema do Circuito \*

\* Banco de Capacitores

C0 1 0 4.5E-3  
S0 1 2 4 0 TIRISTOR  
V0 4 0 PWL(0 -1 1E-3 1)  
D0 0 2 DIODO

\* Bobina Vertical

Rb 3 0 0.107  
Lb 2 3 2.76E-3

\* 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 TIRISTOR VSWITCH(ROFF=1E6 VON=0.5 VOFF=0)  
.IC V(1)=300  
.IC V(4)=-1  
.TRAN 1E-3 50E-3 UIC  
.PROBE  
.END

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 1.75

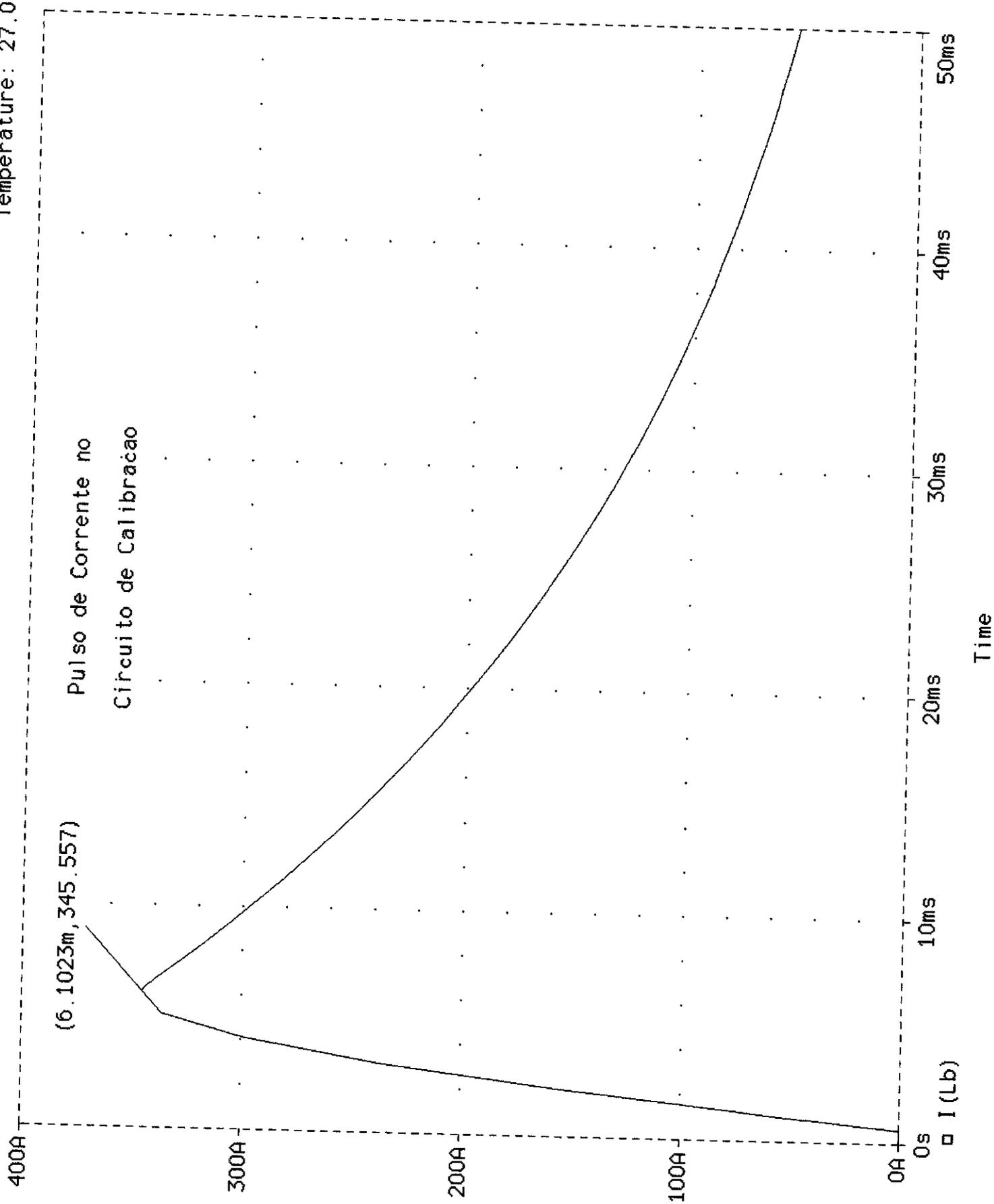


Fig. 8: Pulso de corrente do circuito de calibracao

## 6. Conclusão

Esse relatório teve o objetivo de dar uma idéia do andamento das atividades da bolsa de iniciação científica nos seus primeiros 6 meses. Ainda há muito trabalho pela frente: a construção de um integrador de sinal para ser colocado na saída da bobina, o teste dos circuitos de calibração por meio da calibração da bobina experimental, o projeto e a construção da bobina definitiva, que vai ser usada no tokamak, além da calibração da mesma.

Até agora foi construída a bobina e foram calculados seus parâmetros analiticamente. Não é muito do ponto de vista material, mas de tudo que foi feito, o resultado foi satisfatório e, além da instrução suplementar que está oferecendo, esse tempo serviu para familiarizar o bolsista com o assunto em estudo.

## 7. Referências bibliográficas

1. HUDDLESTONE , R. H. and LEONARD, S. L., **Plasma Diagnostic Techniques**, Cap. 3, Academic Press, 1965.
2. GLASSTONE, S. and LOVBERG, R.H., **Controlled Thermonuclear Reactions**. Cap. 6
3. BUTT E.P. and GILLESPIE, A.B., *Proceedings of The Fifth International Instruments and Measurements Conference*, Sweden, 1960, pp. 938-973, Academic Press, 1961.
4. VUOLO, H. e FERREIRA, J.L., **Bobina de Rogowski para medida de corrente elétrica**, Relatório Privado, IFUSP, 1980.
5. DEL BOSCO, E, **Rogowski coils for START**, Internal Report, OPS Note91.49, Culham, UK, 1991.