

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

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

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).

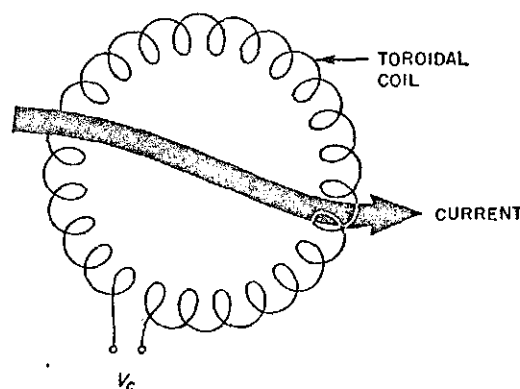


Fig. 1: Bobina de Rogowski.

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 ϕ 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).

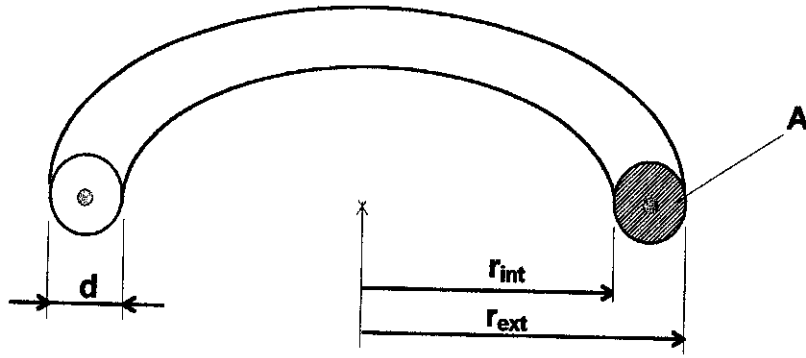


Fig. 2: Esquema de uma bobina de Rogowski (em corte).

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 ρ_ℓ é a resistência por unidade de comprimento do fio.

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

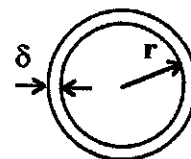
$$\boxed{s = \rho_\ell \pi d T_{Resp}} \quad (\text{Eq. 7}).$$

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, δ a sua espessura e σ 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.

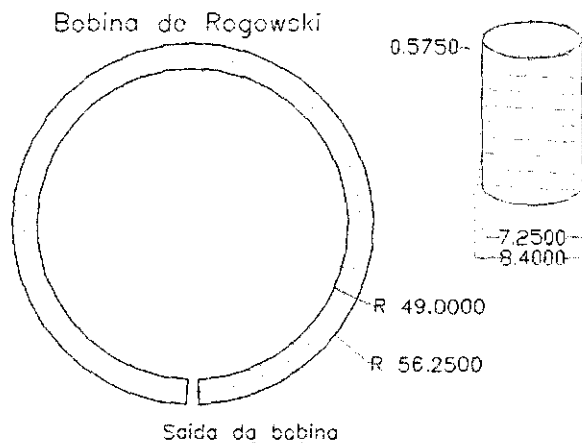


Fig.3: Aspecto da bobina de Rogowski experimental.

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.

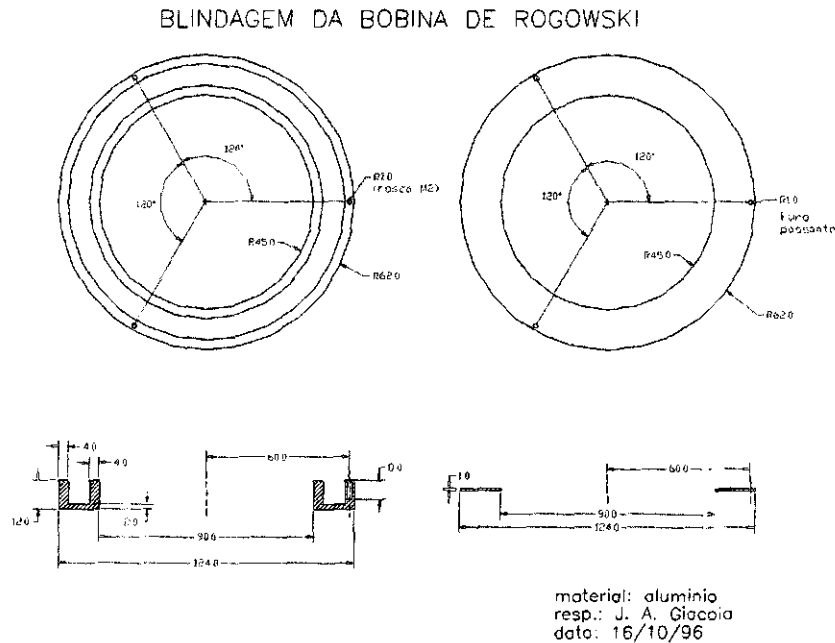


Fig. 4: Blindagem de alumínio para a bobina de Rogowski.

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.

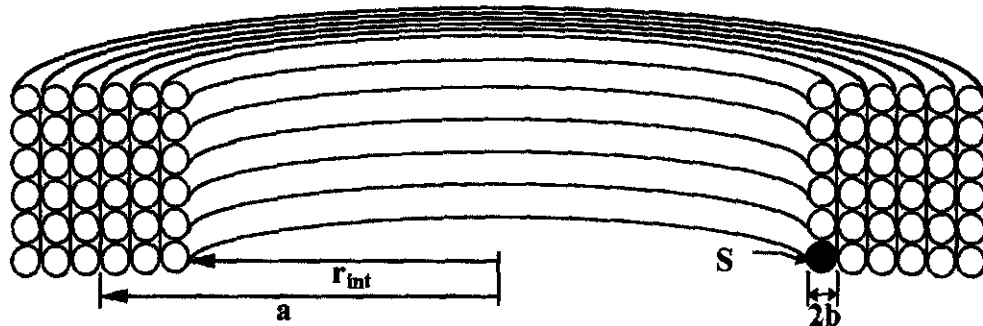


Fig. 5: Medidas da bobina de calibração.

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, $V_{\text{Pico}} = 1,18 \cdot 10^{-3} I_0$.

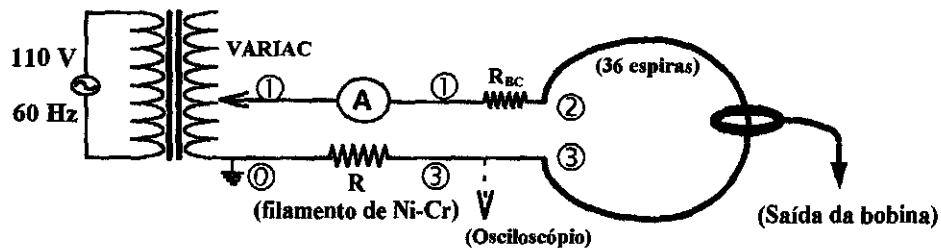


Fig. 6: Esquema do circuito de calibração com corrente alternada.

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).

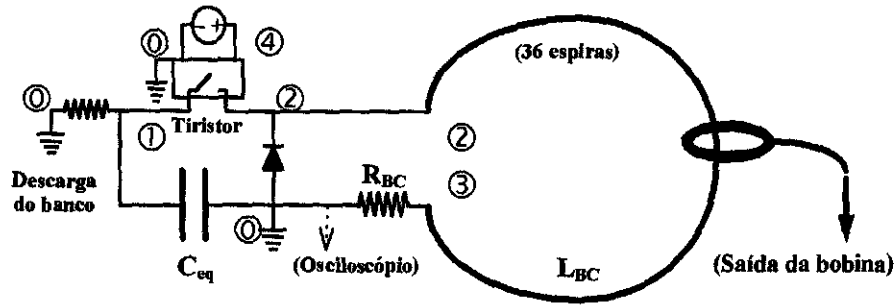


Fig. 7: Banco de capacitores e circuito pulsador.

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 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 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

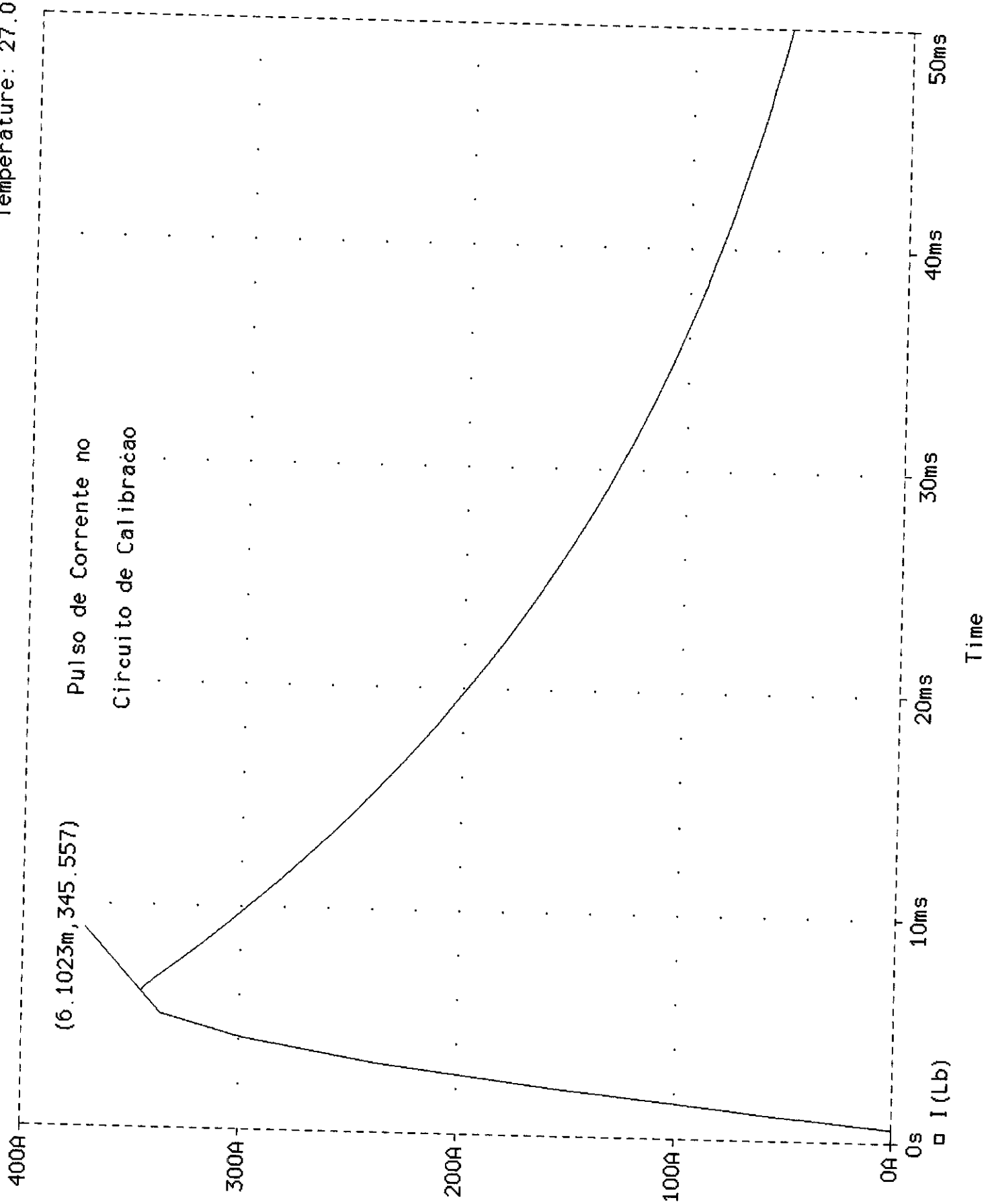


Fig. 8: Pulso de corrente do circuito de calibracao

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.