

SEL
21
03
02

PROJETO DATNAS 001

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS RELATIVOS A CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E SOBRETENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE MÉDIA TENSÃO

NOTA TÉCNICA

DATNAS 001 / NT 003 / OR

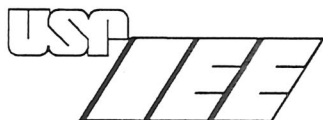
Resistor para Medição de Correntes de Descargas
Atmosféricas

Classificação de Segurança:

1225342
EP-USP



SYSNO	1225342
PROD	0001298
ACERVO EESC	



PROJETO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS
RELATIVOS A CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E
SOBRETENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE MÉDIA TENSÃO**

NOTA TÉCNICA

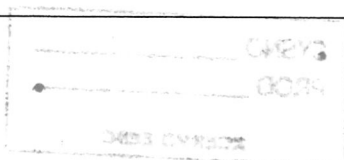
DATNAS 001 / NT 003 / OR

**RESISTOR PARA MEDIÇÃO DE CORRENTES
DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

COORDENADOR:	ALEXANDRE PIANTINI /	IEE/USP
AUTORES:	ALEXANDRE M. CAMARGO / RUY A. C. ALTAFIM / CLOVIS YOSHIO KODAIRA /	EESC/USP EESC/USP IEE/USP
PARTICIPANTES:	JOSÉ CARLOS SARTORI PAULO ROBERTO VERONESE THAÍS OHARA ACÁCIO SILVA NETO CELSO PEREIRA BRAZ RONALDO RONCOLATTO TIAGO DE MATTOS QUEIROZ	EESC/USP EESC/USP IEE/USP IEE/USP IEE/USP CPFL CPFL

Novembro 2001

CPFL - IEE/USP





PROJETO

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS RELATIVOS A CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E SOBRETENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE MÉDIA TENSÃO

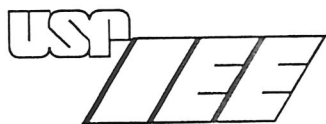
NOTA TÉCNICA

DATNAS 001 / NT 003 / OR

RESISTOR PARA MEDIÇÃO DE CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

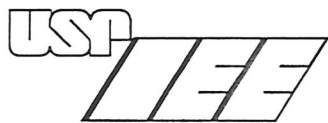
RESUMO

Esta nota técnica descreve o princípio de funcionamento, a construção e as características de um resistor “*shunt*”, desenvolvido para medição de correntes oriundas de descargas atmosféricas. Observa-se que esse dispositivo mostrou-se extremamente adequado para medidas de correntes impulsivas de 2 kA a 100 kA, com respostas temporárias satisfatórias.



LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS, ABREVIATURAS OU CONVENÇÕES

Rs	resistor “ <i>shunt</i> ”
C1	contator
NA	normalmente aberto
NF	normalmente fechado
R	resistência DC
Zc	impedância característica
L	indutância intrínseca
Q	carga elétrica
i(t)	corrente elétrica
e(t)	queda de tensão no resistor “ <i>shunt</i> ”
BNC	conector
H	campo magnético
μ	permeabilidade magnética absoluta
ρ	resistividade elétrica
r	raio do tubo
d	espessura da parede do resistor “ <i>shunt</i> ”
D	diâmetro do resistor “ <i>shunt</i> ”
l	comprimento do resistor “ <i>shunt</i> ”
Rx	receptor
Tx	transmissor
MUX	multiplex
NBI	nível básico de isolamento
RHaefely	resistor “ <i>shunt</i> ” padrão Haefely

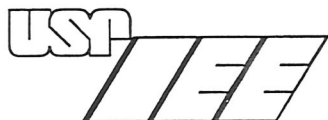


LISTA DE TABELAS

	Pág.
TABELA 1 - Valores calculados da resistência elétrica a partir dos valores medidos.	7
TABELA 2 - Correntes Impulsivas aplicadas e seus valores determinados pelos resistores “shunt” desenvolvido e referência.	7
TABELA 3 - Resistividade elétrica do elemento resistivo “ <i>shunt</i> ”.	10
TABELA 4 - Permeabilidade magnética relativa.	11
TABELA 5 - Descrição de peças e materiais utilizados na construção do resistor “ <i>shunt</i> ”.	12

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1 - Distribuição de probabilidade de corrente de pico i de 126 “first strokes”.	1
FIGURA 2 - Distribuição de probabilidade da taxa di/dt de 212 “strokes” negativos.	1
FIGURA 3 - Distribuição de probabilidade da taxa di/dt máxima de 713 subseqüentes “strokes”.	1
FIGURA 4 - Distribuição de probabilidade da carga Q de 119 descargas atmosféricas.	1
FIGURA 5 - Distribuição de probabilidade da integral do quadrado da corrente de 115 “first strokes”.	1
FIGURA 6 - Resistores “ <i>Shunt</i> ” de baixo valor ôhmico. a) construído com tiras ou b) com fio c) construção tubular.	2
FIGURA 7 - Circuito para medição de corrente impulsiva.	2
FIGURA 8 - Circuito equivalente do resistor “ <i>shunt</i> ”, para altas correntes e baixos valores ôhmicos.	2
FIGURA 9 - Resistor “ <i>shunt</i> ” tipo tubular.	3
FIGURA 10 - Circuito Equivalente do Resistor “ <i>Shunt</i> ” Tubular.	3
FIGURA 11 - Desenho esquemático do “ <i>shunt</i> ” proposto.	3
FIGURA 12 - Desenho “explodido” e em corte do resistor “ <i>shunt</i> ” proposto.	4
FIGURA 13 - Tubo externo 8, com a flange 9 de conexão com a malha de aterramento.	5
FIGURA 14 - Tubo interno 1 de aço inox revestindo o tudo de sustentação de Fenolite.	5
FIGURA 15 - Tampa de alumínio 5 com o conector BNC.	5
FIGURA 16 - Montagem do resistor “ <i>shunt</i> ”.	5
FIGURA 17 - Detalhe do conector de entrada na tampa 2 e o anel de “teflon” 10.	5
FIGURA 18 - Resistor “ <i>shunt</i> ” montado.	5
FIGURA 19 - Torre com sistema de medição da corrente da descarga atmosférica.	5
FIGURA 20 - Esquema detalhado do sistema de medição de corrente da descarga atmosférica.	6
FIGURA 21 - Esquema elétrico do sistema de medição da corrente da descarga atmosférica.	6
FIGURA 22 - Sistema de aquisição de dados.	6
FIGURA 23 - Circuito de ensaio para medida de resistência elétrica do “ <i>shunt</i> ”.	7
FIGURA 24 - Circuito de ensaio de impulso.	7
FIGURA 25 - 1º Aplicação de corrente impulsiva.	7
FIGURA 26 - 2º Aplicação de corrente impulsiva.	8
FIGURA 27 - 3º Aplicação de corrente impulsiva.	8
FIGURA 28 - Detalhe dos materiais usados na construção do “ <i>Shunt</i> ”.	12
FIGURA 29 - Desenho explodido e em corte das peças do “ <i>Shunt</i> ” proposto.	12



SUMÁRIO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	1
2. DESCRIÇÃO DO PROJETO DO RESISTOR “SHUNT” DESENVOLVIDO PARA O PROJETO CPFL/USP.....	3
2.1 Considerações Gerais.....	3
2.2 Descrição Construtiva do Resistor “Shunt”.....	4
2.3 Como Será Instalado o Resistor “Shunt”.....	5
3. PARTE EXPERIMENTAL.....	6
3.1 No Laboratório de Medidas e Padrões da EESC - USP	6
3.2 No Laboratório do IEE - USP	7
4. CONCLUSÕES.....	8
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	8
6. ANEXO I.....	10
7. ANEXO II.....	12

1 INTRODUÇÃO TEÓRICA

Desde a década de 20, inúmeros sistemas foram desenvolvidos para a medição de correntes oriundas de descargas atmosféricas [1,2]. Dentre eles, um dos sistemas mais eficientes consiste na medição das correntes em torres captoras por resistores "shunt" ou por transformadores de impulso de corrente [3, 4, 5, 6]. Este sistema também torna possível determinar inúmeros parâmetros das descargas, tais como: a amplitude da corrente, a taxa de subida da corrente (di/dt)_{max}, a carga elétrica da corrente $Q = \int i(t)dt$ e integral da corrente ao quadrado.

A relevância desses quatro parâmetros e seus valores estatísticos encontram-se melhor descritos em [2], através de inúmeras curvas de probabilidade, que também podem ser vistas nas Figs. 1, 2, 3, 4 e 5. Essas curvas forneceram subsídios para o projeto e o dimensionamento de todo o sistema de medição desenvolvido neste trabalho.

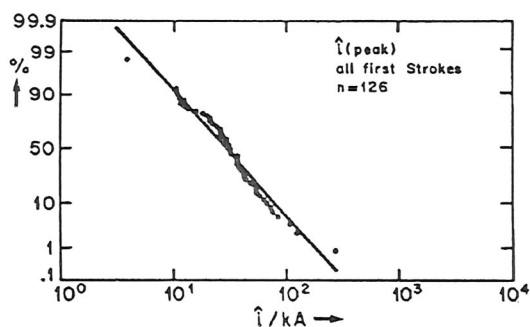


Fig. 1 - Distribuição de probabilidade de corrente de pico $\hat{i}$ de 126 "first strokes".

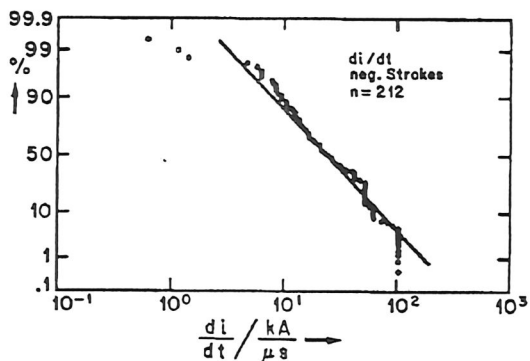


Fig. 2 - Distribuição de probabilidade da taxa di/dt de 212 "strokes" negativos.

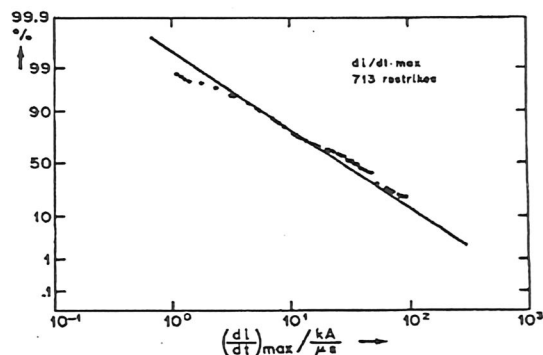


Fig. 3 - Distribuição de probabilidade da taxa di/dt máxima de 713 subsequentes "strokes".

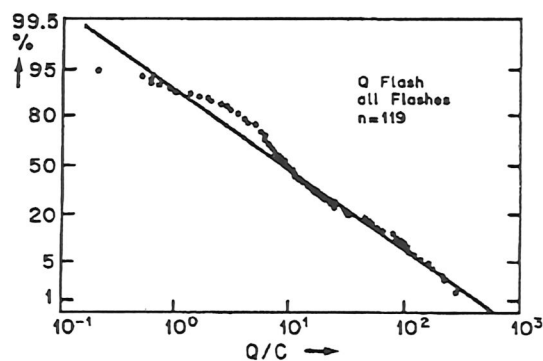


Fig. 4 - Distribuição de probabilidade da carga Q de 119 descargas atmosféricas.

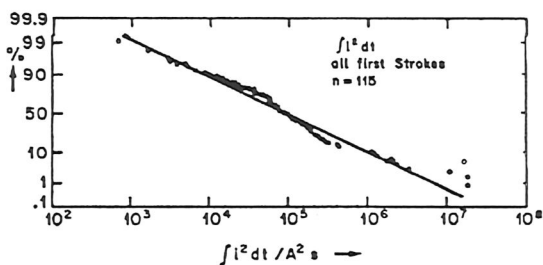


Fig. 5 - Distribuição de probabilidade da integral do quadrado da corrente de 115 "first strokes".

No sistema de medição em questão, as correntes das descargas atmosféricas deverão ser inicialmente captadas por uma torre, especialmente construída para esta finalidade como descrito em nota técnica anterior [7], e posteriormente medidas por um resistor "shunt" acoplado a um osciloscópio digital. A escolha recaiu no resistor "shunt" por ele apresentar alto nível de sinal com influências eletromagnéticas desprezíveis, fácil calibração em tensões impulsivas e DC, e resistência praticamente constante para toda a faixa de frequência considerada (< 10 MHz) [8].

Do ponto de vista construtivo, os resistores “shunt” podem ser divididos em duas classes: os tubulares e os “wirewound”. As configurações tubulares são geralmente aplicadas nas medições das correntes impulsivas de curta duração, similares àquelas geradas pelas descargas atmosféricas, com valores de resistências variando de 0,1 a 100 mΩ, por serem os menos susceptíveis a influências eletromagnéticas. Já os “wirewound” são normalmente construídos com resistências que variam de 50 mΩ a 10 Ω, normalmente dedicados à medição de baixas correntes. Na Fig. 6, encontram-se ilustradas algumas montagens padrão de resistores “shunt” de baixo valor ôhmico descritas na literatura [9].

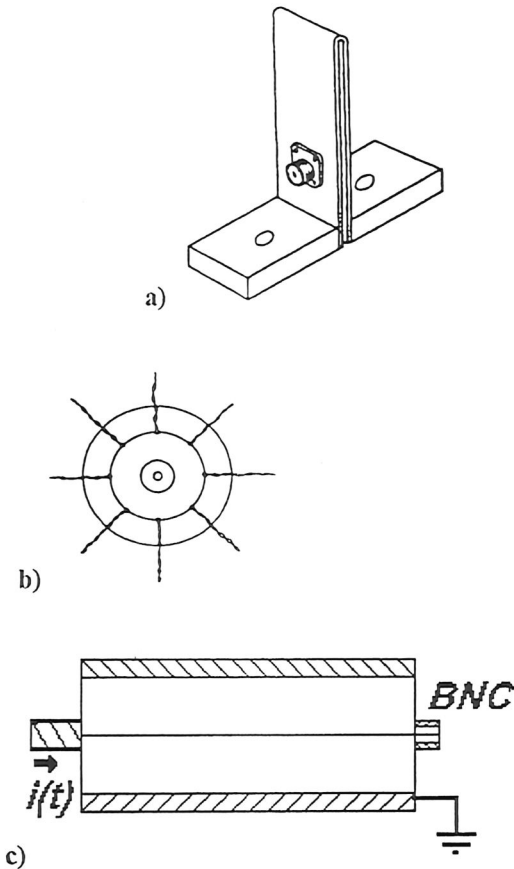


Fig. 6 – Resistores “shunt” de baixo valor ôhmico. a) construído com tiras ou b) com fio c) construção tubular.

Um resistor “shunt” ideal pode ser representado por uma impedância puramente resistiva em seus terminais, como ilustrado na Fig. 7.

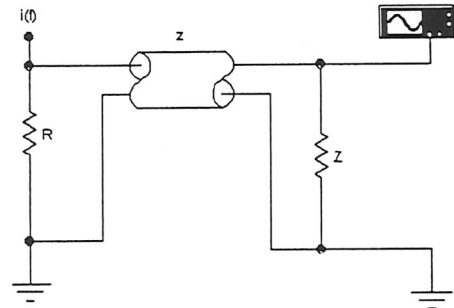


Fig. 7 – Circuito para medição de corrente impulsiva

Neste caso, a corrente a ser medida pode ser determinada pela lei de Ohm, ou seja:

$$i(t) = \frac{e(t)}{R} \quad (1)$$

Na prática, entretanto, para resistores com baixos valores ôhmicos, submetidos a correntes com valores muito elevados, as indutâncias intrínsecas tornam-se não desprezíveis, principalmente aquelas relativas ao efeito pelicular (Skin) [10]. Desta forma, a queda de tensão $e(t)$ deve ser agora obtida considerando o circuito equivalente da Fig. 8, ou seja:

$$e(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

onde R é a resistência em regime contínuo e L a indutância do resistor.

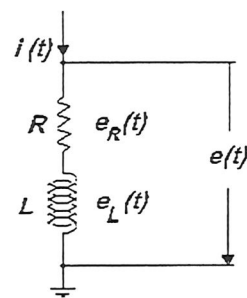


Fig. 8 – Circuito equivalente do resistor “shunt”, para altas correntes e baixos valores ôhmicos.

A indutância intrínseca L , como introduz sérias distorções nas formas de ondas, deve ser mantida tão pequena quanto possível. Esta condição de baixo valor indutivo é alcançada pelo resistor “shunt” tubular, onde o campo magnético em seu interior é praticamente nulo quando uma distribuição de corrente uniforme flui através de seu elemento resistivo.

Na Fig. 9 é possível visualizar um resistor “shunt” tubular genérico, onde a corrente a ser medida entra no resistor pelo terminal 1, flui através do cilindro resistivo 2 e retorna pelo cilindro condutivo externo 3. A conexão 4 torna possível medir as tensões que surgem no cilindro resistivo pela conexão BNC-5.



Fig. 9 – Resistor “shunt” tipo tubular

No espaço entre o condutor de ligação 4 e a parede do tubo interno, os campos magnéticos devido a corrente $i(t)$ são praticamente nulos, fazendo com que esta montagem apresente um comportamento de um resistor ôhmico puro. Na realidade, até mesmo esses resistores tubulares apresentam um comportamento indutivo. A indutância intrínseca, neste caso, é determinada basicamente pelo efeito pelicular do cilindro interno, como demonstraram inúmeros autores [11, 12, 13].

Quando o condutor tubular resistivo é atravessado por uma corrente $i(t)$ tipo degrau, esta corrente em um primeiro momento, flui por uma camada infinitamente fina, na superfície do condutor, gerando um campo magnético H . Esse campo magnético, para tubos de espessuras de parede d , muito menores que o raio r , ou, $d \ll r$, podem ser calculados, segundo [9], pela expressão:

$$H(x,t) = H_0 \left[\frac{x}{d} + \frac{2}{\pi} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(-1)^v}{v} \cdot \sin\left(\pi v \frac{x}{d}\right) \cdot e^{-\frac{v^2 T}{\tau}} \right] \quad (3)$$

sendo $T = \mu d^2 / \pi^2 \rho$, onde ρ é igual à resistividade do material e μ a permeabilidade magnética absoluta do material $\mu = \mu_0 \cdot \mu_{rel}$.

Praticamente, este efeito pode ser também encontrado considerando o resistor “shunt” como o circuito equivalente mostrado na Fig. 10. Neste circuito, as resistências R' são iguais a nR_0 , sendo n o número de elementos paralelos e R_0 dado pelo valor DC do “shunt”, ou pela equação 4:

$$R_0 = \rho \frac{l}{\pi d D} \quad \text{para } D \gg d \quad (4)$$

Sendo l é comprimento do tubo, d é a espessura da parede e D é o diâmetro do tubo, as indutâncias L' são iguais à L_0 / n , com,

$$L_0 = \frac{\mu d l}{2\pi r} \quad (5)$$

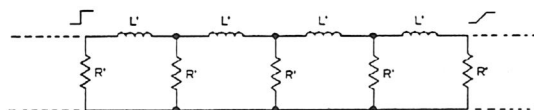


Fig. 10 – Circuito Equivalente do Resistor “shunt” Tubular.

2 DESCRIÇÃO DO PROJETO DO RESISTOR “SHUNT” DESENVOLVIDO PARA O PROJETO CPFL/USP

2.1 Considerações Gerais

Embora neste projeto, o resistor “shunt” desenvolvido apresente características gerais similares ao resistor “shunt” tubular, como já mencionado, ele possui inúmeras inovações tecnológicas. Seu desenvolvimento esquemático completo encontra-se ilustrado na Fig. 11, e um desenho expandido na Fig. 12.

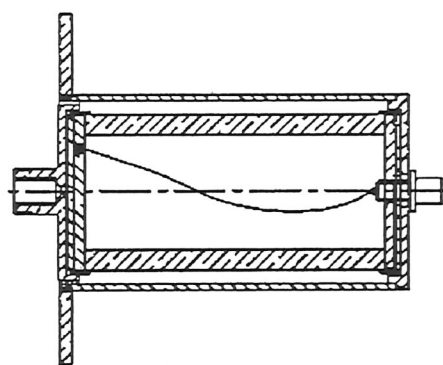


Fig. 11 – Desenho esquemático do “shunt” proposto

Como primeira inovação, cita-se seu elemento resistivo, completamente diferente dos convencionais que são compostos de ligas de Níquel, Cromo e Ferro. Ele é de aço inox tipo 309 – classe dos Austemíticos, não magnético, com resistividade $\rho = 7,8 \times 10^{-7} \Omega m$, permeabilidade magnética relativa igual a 300, e grande capacidade térmica. Esta última característica mostrou-se decisiva para o projeto, tendo em vista os altos valores das correntes a serem medidas, de 2 kA a 100 kA. Neste caso, para que

fosse conseguido o valor ôhmico em torno de $5\text{ m}\Omega$, que é o desejado para medir essas correntes, foi necessário usinar o elemento resistivo tubular com uma espessura reduzida em torno de décimos de milímetro. Tubos com paredes tão finas não apresentam praticamente resistência mecânica e para serem usinados, necessitam de algum tipo de artifício tecnológico. Neste caso, a usinagem de uma parede de $0,15\text{ mm}$ só foi possível após ter sido introduzido no elemento resistivo de aço inox um tubo de fenolite. A espessura diminuta das paredes do elemento resistivo também mostrou-se essencial para a redução da indutância intrínseca, por compensar a alta permeabilidade relativa do aço, em torno de 300 como já mencionado.

Outra importante inovação tecnológica foi a colocação de duas peças isolantes, indicadas no desenho da Fig. 12 como peças 6 e 7, para reduzirem as resistências de contato na medida de tensão. Cabe ressaltar aqui, que no resistor tubular, a medição da tensão é feita por um terminal separado da medição da corrente, similar ao sistema de quatro eletrodos para medida de resistências elétricas de baixo valor ôhmico.

Também ressalta-se como característica do resistor "shunt" desenvolvido, o cilindro externo condutivo de alumínio, peça 8. Esta peça apresenta duas importantes funções: uma de elemento condutor da corrente de retorno e outra a de proteger o elemento resistivo contra danos mecânicos.

2.2 Descrição Construtiva do Resistor "Shunt"

O "shunt" resistivo consiste num tubo usinado em aço inox de $57,7\text{ mm}$ de diâmetro, $108,8\text{ mm}$ de comprimento, com $0,15\text{ mm}$ de espessura de parede (ver peça 1 – Fig. 12). Duas tampas, peças 4 e 5, de alumínio de $3,6\text{ mm}$ de espessura, onde é feita a medição da diferença de potencial do resistor, fecham o tubo. Na tampa inferior 5, foi colocado um conector tipo "BNC", indicado na Fig. 12, como peça 11. Todo esse conjunto é colocado dentro de outro tubo de alumínio, peça 8, com 76 mm de diâmetro, 135 mm de comprimento e 2 mm de espessura de parede. Duas outras tampas, também em alumínio usinado, fecham o circuito entre o tubo resistivo interno de aço inox, peça 1, e o tubo externo de alumínio, peça 8, sendo que a tampa superior, peça 2, possui um conector para entrada da corrente da descarga atmosférica, sendo isolada do tubo externo, peça 8, por um anel de "teflon", peça 10. A tampa inferior, peça 3, fecha o tubo externamente, possuindo no centro um furo para a passagem do conector tipo "BNC", peça 11. O tubo externo 8, possui uma flange, indicada como peça 9, de 125 mm de diâmetro e $5,0\text{ mm}$ de espessura, onde será conectado o

cabo de saída para a malha de aterramento na base da torre.

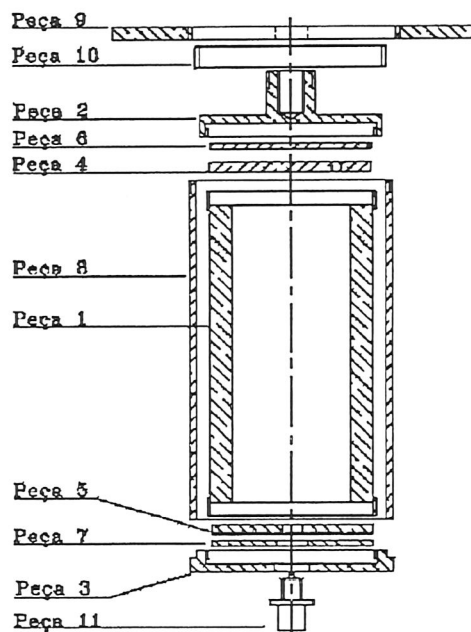


Fig. 12 – Desenho expandido e em corte do resistor "shunt" proposto.

Desta forma seguindo a Fig. 12, a corrente da descarga atmosférica entra pela tampa superior 2, passando pela tampa de medição de potencial 4 e percorre o tubo interno de aço inox 1, passa pela tampa inferior de medição de potencial 5, e pela tampa de fechamento inferior e flui através do tubo externo 8, até alcançar a flange de conexão à malha de aterramento 9.

No circuito de tensão, a diferença de potencial desenvolvida nas extremidades do tubo resistivo de aço inox 1, é medida através das tampas do tubo, peça 4 e 5, estas tampas superior e inferior estão ligadas ao conector tipo "BNC" 11, o qual estará conectado por um cabo coaxial ao osciloscópio do sistema de medição de corrente.

Algumas fotos do resistor "shunt" desenvolvido podem ser vistas nas Figs. 13, 14, 15, 16, 17 e 18.

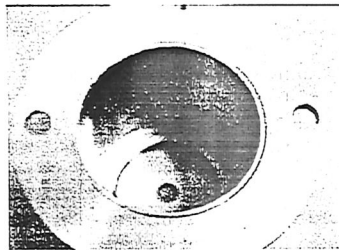


Fig. 13 – Tubo externo peça 8, com a flange de conexão com a malha de aterramento peça 9.

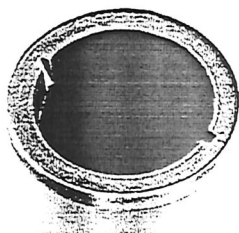


Fig. 14 – Tubo interno 1 de aço inox revestido com o tubo de sustentação de Fenolite.

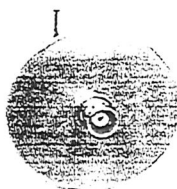


Fig. 15 – Tampa de alumínio com o conector BNC (peça 5).

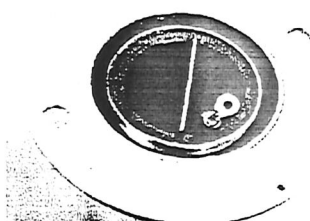


Fig. 16 – Montagem do resistor "shunt".

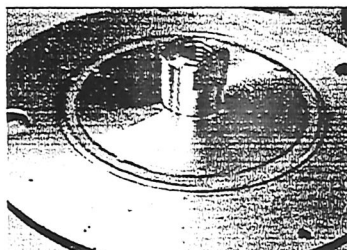


Fig. 17 – Detalhe do conector de entrada na tampa e o anel de "teflon", peças 2 e 10, respectivamente.

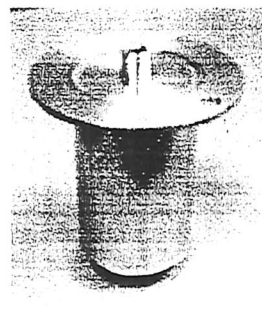


Fig. 18 – Resistor "shunt" montado.

De posse desses dados e das equações 4 e 5, pôde-se determinar a indutância intrínseca, ou seja:

$$L_0 = \frac{(300 \times 4 \times \pi \times 10^{-7}) (1,5 \times 10^{-4}) (10,88 \times 10^{-2})}{2 \times \pi \times (5,77 \times 10^{-2} / 2)}$$

$$\Rightarrow L_0 = 3,39 \times 10^{-8} \text{ H}$$

e a resistência DC igual à.

$$R_0 = 7,80 \times 10^{-7} \frac{10,88 \times 10^{-2}}{\pi (1,5 \times 10^{-4}) (5,77 \times 10^{-2})} \Rightarrow R_0 = 3,12 \text{ m}\Omega$$

2.3 Como Será Instalado o Resistor "Shunt"

Conforme indicado em [7], o resistor "shunt" será instalado na base de uma torre onde deverão incidir as descargas atmosféricas, e a corrente fluirá por ele até atingir o sistema de aterramento. Para que isto ocorra, a base da torre será isolada da terra por isoladores de porcelana tipo pedestal, como indicado na Fig. 19. Esta torre será metálica, com estais isolantes e altura de aproximadamente 60 m.

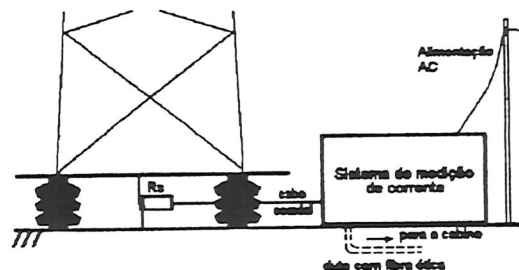


Fig. 19 – Torre com sistema de medição da corrente da descarga atmosférica [7].

O sistema de medição no qual o resistor "shunt" estará inserido será composto: osciloscópio, "mini modem", bateria, carregador, contator e

protetor contra surtos dispostos como indicado na Fig. 20.

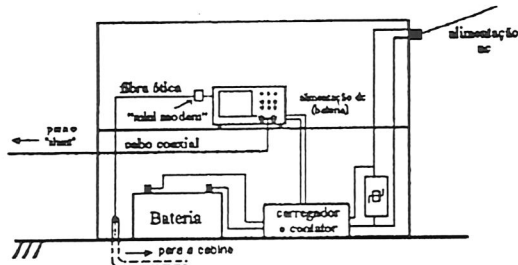


Fig. 20 – Esquema detalhado do sistema de medição de corrente da descarga atmosférica [7].

A Fig. 21 representa o esquema de alimentação dos sistemas de medição de correntes impulsivas na torre.

Em dias de tempestade, a alimentação de rede do sistema de medição de correntes impulsivas será desligada, por meio de uma chave-faca situada na cabine de medição. Isto provocará a abertura dos contatos NA do contator cuja bobina deixará de ser energizada, com isso o carregador será desligado da rede, enquanto que a bateria será ligada ao osciloscópio através dos contatos NF do mesmo contator. Para evitar sobretensões que poderiam danificar o sistema, a rede será protegida na entrada do ponto de medição.

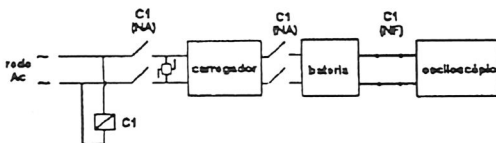


Fig. 21 – Esquema elétrico do sistema de medição da corrente da descarga atmosférica [7].

Terminada a medição e com o afastamento da tempestade, a chave da cabine será fechada, restabelecendo-se a alimentação pela rede do carregador, desligando-se, ao mesmo tempo, o osciloscópio da bateria.

Sinais elétricos de correntes de descarga atmosférica armazenada no osciloscópio serão transmitidos via fibra ótica até a cabine de medição, sendo a conversão sinal elétrico/ótico e vice-versa feita por um "mini modem", o qual pertence ao sistema de aquisição de dados resumidamente detalhados na Fig. 22. Os outros "mini modem" mostrados no sistema de aquisição de dados recebem sinais provenientes de medições de tensões induzidas em uma linha de testes situada nas proximidades da torre.

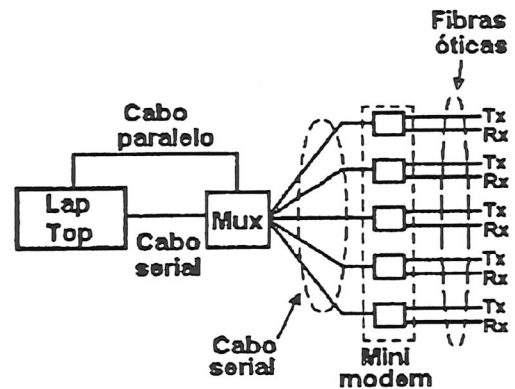


Fig. 22 – Sistema de aquisição de dados [7].

Uma caixa blindada abrigará o sistema de medição, devendo ser dada especial atenção aos efeitos da temperatura e da umidade a que estarão sujeitos os componentes do sistema.

Vale ressaltar que a alimentação do sistema de medição na torre será aérea e acionada por uma chave-faca, com nível básico de isolamento (NBI) de 95 kV, situada na cabine. Essa forma de alimentação foi escolhida para evitar que as diferenças de potencial causadas no solo por descargas atmosféricas diretas na torre sejam transferidas para a cabine, danificando a instalação ou os equipamentos contidos nela.

Outras informações sobre como será instalado o resistor "shunt", localização da torre, da cabine e planta geral de localização dos sistemas de medição e aquisição, estão melhor descritos em [7].

3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1 No Laboratório de Medidas e Padrões da EESC – USP

Os ensaios realizados no Laboratório de Medidas e Padrões na EESC- USP, possibilitaram medir a resistência elétrica do resistor "shunt", pelo método amperímetro-voltímetro, e obedeceram ao diagrama esquemático mostrado na Fig. 23. A corrente elétrica foi medida com um amperímetro Digital – Yokogawa 2531 A, e a tensão por um MultiMeter HP 3458 A. Os resultados desse ensaio encontram-se na Tabela 1.

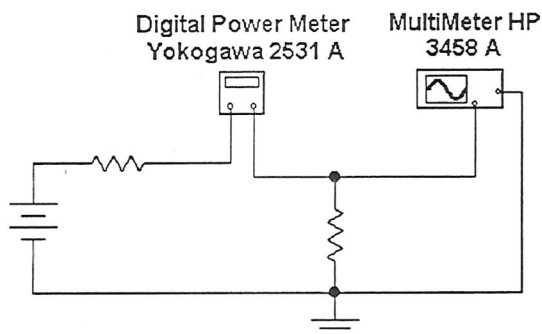


Fig. 23 – Circuito de ensaio para medida de resistência elétrica do "shunt"

Os valores de resistência elétrica obtida através do método tensão x corrente DC para o resistor "shunt", estão dispostos na tabela 1.

	Valores Medidos em mΩ
1º Ensaio	3,6781
2º Ensaio	3,6629
3º Ensaio	3,6811
Média = 3,674 mΩ - Desvio Padrão 0,00967	
- *Valor Medido por impulso no IEE - USP = 3,853 mΩ	

Tabela 1 – Valores medidos da resistência elétrica.

3.2 No Laboratório do IEE – USP

Objetivando determinar as características dinâmicas do resistor "shunt", quanto a sua resposta temporal às solicitações impulsivas, foram feitos inúmeros testes no Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo (USP – SP). Nesses ensaios, foram aplicadas, no resistor "shunt" desenvolvido, correntes impulsivas com formas de ondas e amplitudes descritas na Tabela 2. O diagrama esquemático desse circuito de ensaio pode ser visualizado na Fig. 24. Ele é basicamente um circuito RLC superamortecido, onde C é um banco de capacitores, de 2,25 μF; L indutância de 30 μH; R Shunt, o resistor "shunt" em teste, e Rs Haelely é o resistor shunt de referência Haelely. Também completa o circuito, dois blocos de óxido de zinco de 4kV tipo pára-raio de subestação (10 kA), para evitar oscilações no impulso gerado.

Dos resultados da Tabela 2, pôde-se determinar o valor do resistor "shunt" desenvolvido, como sendo igual a 3,853 mΩ.

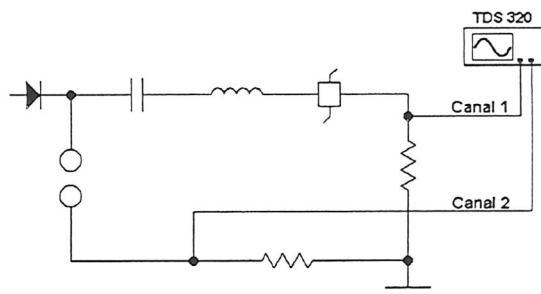


Fig. 24 – Circuito de ensaio de impulso

	Resistor "Shunt" Desenvolvido R Shunt = 3,853 mΩ			Resistor "Shunt" Haelely (Referência) Rs Haelely = 2,623 mΩ		
	Forma de Onda	Valor de Crista	Canal Usado	Forma de Onda	Valor de Crista	Canal Usado
1ª Aplicação	8,00/17,80 μs	4,90 kA	Canal 2	8,25/ 1,81 μs	4,84 kA	Canal 1
2ª Aplicação	7,80/17,70 μs	8,41 kA	Canal 2	8,30/17,90 μs	8,42 kA	Canal 1
3ª Aplicação	5,25/11,70 μs	12,77 kA	Canal 2	5,75/12,10 μs	12,80 kA	Canal 1

Tabela 2 – Correntes Impulsivas aplicadas e seus valores determinados pelos resistores "shunt" desenvolvido e referência.

Os oscilogramas obtidos por esses ensaios podem ser vistos nas Figs. 25, 26 e 27, nelas são mostradas as curvas referentes ao resistor "shunt" (Rs) desenvolvido e resistor "shunt" Haelely padrão (RHaelely).

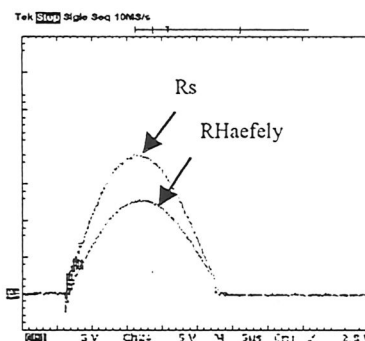


Fig. 25 – 1ª Aplicação de corrente impulsiva

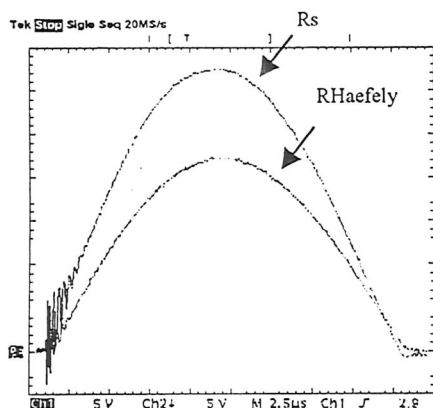


Fig. 26 – 2ª Aplicação de corrente impulsiva

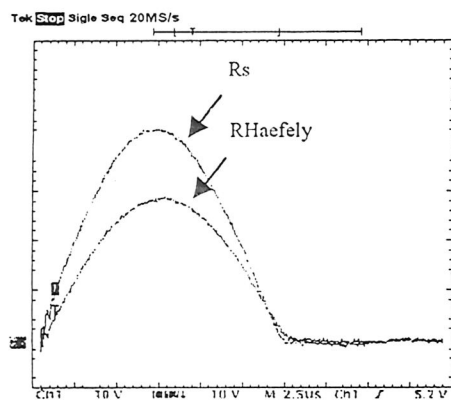


Fig. 27 – 3ª Aplicação de corrente impulsiva

4 CONCLUSÕES

A literatura sobre resistores “shunt” é deveras escassa, em razão de seu grande interesse tecnológico. Contudo, foi possível desenvolver um resistor “shunt” tubular que mostrou ser extremamente adequado para as medidas das correntes das descargas atmosféricas. Como ilustram as Figs. 25, 26 e 27, suas respostas impulsivas são muito satisfatórias, quando comparadas com o Padrão - Haefely. Algumas oscilações que podem ser vistas no início de sua onda de resposta, podem ser atribuídas muito mais a ruídos espúrios do sistema de medição, como por exemplo cabos não blindados, e não ao “shunt” propriamente dito. Elas deverão ser eliminadas durante a fase final de montagem, onde todo o sistema será blindado contra ondas eletromagnéticas. Também não foram observadas grandes distorções entre seu valor ôhmico em regime DC e em regime impulsivo, indicando sua excelente estabilidade na gama de frequência a ser estudada.

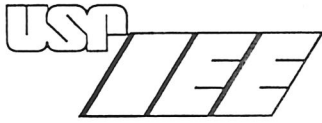
Embora o resistor “shunt” já tenha sido testado, alguns testes extras ainda deverão ser executados, como o de aplicar uma onda quadrada para

determinar seu tempo de subida e determinar experimentalmente a indutância intrínseca. O grande problema deste teste, é o circuito de ensaio, que precisa gerar altos valores de corrente, em torno de 10 a 100 A, com tempos de subida de 2 ns. A chave de mercúrio a ser utilizada, deve ser suficientemente robusta para suportar essas correntes.

Também está sendo preparada uma caixa especial para a colocação do “shunt” ao tempo e também prover as blindagens eletromagnéticas ao sistema.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Foust, C. M.; Kuehni, H. P., The Surge-crest Ammeter, *General Electric Review*, v. 35, n. 12, p. 644-648, Dec. 1932.
- [2] Berger, K.; Anderson, R. B. And Kröninger, H., Parameters of Lightning Flashes, *Electra*, v.41, p.23-37, 1975.
- [3] Yokoyama, S.; Miyake, K.; Mitani, H.; Takanishi, A., Simultaneous measurement of lightning induced voltages with associated stroke currents. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 102, n. 8, p. 2420-27, Aug. 1983.
- [4] Yokoyama, S.; Miyake, K.; Mitani, H.; Yamazaki, N., Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 1, n. 2, p. 129-39, Apr. 1986.
- [5] Nakahori, K.; Egawa, T.; Mitani, H., Characteristics of winter lightning currents in Hokuriku district. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 101, n. 11, p. 4407-12, Nov. 1982.
- [6] Goto, Y.; Narita, K.; Komuro, H.; Honna, N., Current waveform measurement of winter lightning struck an isolated tower. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 20., Interlaken, 1990. *ICLP: Proceedings*. Interlaken, Swiss Electrotechnical Association, 1990. p. 1.9P/1-1.9P/6.
- [7] Ohara, T.; Piantini, A.; Janiszewski, J. M. Definições para implantação de sistema de aquisição de dados referentes a correntes de descargas atmosféricas e tensões induzidas em LD's. São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia, DATNAS 001/NT 002/OR, Jun. 2001.



-
- [8] Malewski, R., Wirewound shunt for measurement of fast current impulses. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 103, n. 10, p. 2927 - 2933, Oct. 1984.
 - [9] Schwab, A. Low-resistance shunts for impulse currents. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 101, n. 11, p. 2251-2257, Jul. 1970.
 - [10] Lago, B.; Eatock R., Coaxial shunt, **Proc. IEE**, v. 114, p. 1317 – 1324, 1967.
 - [11] Park, E. H., Shunt and inductors for surges current measurement. **N.B.S., J. Res.** v. 39, p. 191 – 212, 1947.
 - [12] Silsbee, F. G., Notes on the design of four terminal resistance standards for a.c. **N.B.S., E. Res.** v. 4, p. 73 – 83, 1930.
 - [13] Bellaschi, P.L., Heavy surge currents, generating and measurement, **El. Engn.**, v.

6 ANEXO I

O material utilizado para construção do elemento resistivo do “shunt”, citado anteriormente é o “Type 309 Stainless” com $\rho = 78 \mu\Omega \text{ cm}$, da tabela 3 de resistividade elétrica ρ retirada da revista “Advanced Materials & Process”, Dezembro de 1999, pág. 37.

Resistivity		Electrical resistivity		Resistivity	
Material	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	Material	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	Material	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$
Graphite	910.1	M-27 steel (max)	47	AISI 1010 steel	12
Silicon carbide (SiC)(max)	200	86Pt-14Ru	46	Cu-2Be (max)	115
Thermentol	162	45 Permalloy	45	Cu-5Sn+P	11
72Fe-23Cr-5Al	138.8	90Pt-10Ru	43	Palladium	10.8
75Ni-20Cr-3Al	132.98	60Pd-40Ag	43	90Au-10Cu	10.8
80Ni-20Cr	112.2	Supermendur	40	75Au-25Ag	10.8
60Ni-16Cr-24Fe	112.2	Permendur	40	Platinum	10.6
72Mn-18Cu-10Ni	112.2	45Pd-30Ag-20Au-5Pt	39	96Cu-6Ni	9.93
78.5Ni-20Cr-1.5Si (80-20)	108.05	41.7Au-32.5Cu-18.8Ni-7Zn	39	Iron 99.99%	9.71
35Ni-20Cr-45Fe	101.4	85Cu-10Mn-4Ni (shunt manganin)	38.23	99.8Ni	7.98
HT (Fe-39Ni-18Cr)	100	Molybdenum disilicide, MoSi ₂	37.24	Yellow brass	6.4
67Cu-5Ni-27Mn	99.74	96Pt-4W	36	Cu-35Zn	6.4
HH (Fe-26Cr-12Ni)	80	60Pd-40Cu	35(c)	Tungsten	5.65
75Fe-22Ni-3Cr	78.13	70Pt-30Ir	35	Cu-20Zn	5.4
Type309 Stainless	78	35Pd-30Ag-14Cu-10Pt-10Au-1Zn	35	90Ag-10Pd	5.3
Alnico I	75	75Pt-25Ir	33	Al7075 (T6)	5.2
Stainless Type 316	74	95Pt-5Ru	31.5	Molybdenum	5.2
Stainless Type 302	72	50Pd-50Ag	31.5	98Cu-2Ni	4.99
M-15 steel (max)	69	55Ni-18Ag	31	85Ag-15Cd	4.93
Alnico II	65	Fe-6W	30	Al 502 (all)	4.9
Supermalloy	65	78Cu-22Ni	29.92	Cu-15Zn	4.7
Stainless Type 446	61	Fe-3.5Cr	29	90Ag-10Au	4.2
Alnico III	60	Fe-17Co	28	Al 6061 (T6)	4.0
Mumetal	60	90Pb-10Ru	27	Al 7075 (O)	3.8
Stainless Type 430	60	Fe-36Co	27	Cu-1.25Sn-P	3.6
Stainless Type 405	60	60Ag-40Pd	23	97Ag-3Pt	3.5
66.5Fe-22Ni-8.5Cr	58.18	Fe-35Co-1Cr	20	Al 2024 (O)	3.4
M-17 steel (max)	58	71Ni-29Fe	19.95	Al 1100 (O)	2.9
Stainless Type 416	57	95Pt-5Ir	19	72Ag-26Cu-2Ni	2.9
67Ni-30Cu-1.4Fe-1Mn	56.52	Carbon steel, 0.65C	18	97Ag-3Pd	2.9
M-19 steel (max)	56	Cunife	18	Gold	2.35
AISI 1040 steel	56	M-50 steel	18	Cu-1Cr (max)	2.10
M-5 steel (max)	52	Fe-78Ni	16	90Ag-10Cu	2.0
Alnico VI	50	75Fe-22Ni-3Cr	15.79	Cu-0.5Te	1.82
Grain-Oriented 3.0Si steel	50	88Cu-8Sn-4Zn	15	Cu-1.0Pb	1.76
55Cu-45Ni	49.87	69Au-25Ag-6Pt	15	ETP copper	1.71
70Cu-20Ni-10Mn	48.88	70Ag-30Pd	14.3	OF copper	1.71
87Cu-13Mn (manganin)	48.21	Tantalum	12.45	Pure copper	1.67
Alnico V	47			Fine silver	1.59

Electrical conductivity is given as a percentage of the international annealed copper standard (IACS). The conductivity in %IACS is equal to 1724.1 divided by the electrical resistivity of the material in nano-ohm meters, $n\Omega\text{m}$.

Electrical resistivity is defined as the electrical resistance of a material, multiplied by the cross-sectional area of the wire and the unit length. It is the reciprocal of the conductivity.

A tabela 4 mostra a permeabilidade magnética relativa do aço utilizado $\mu_r = 300$. Retirada do livro “Handbook for Electrical Engineers”, chap. 5, página 481.

<i>Material</i>	μ_r
Bismuth	0.9999986
Paraffin	0.99999942
Wood	0.9999995
Silver	0.99999981
Aluminum	1.00000065
Beryllium	1.00000079
Nickel chloride	1.00004
Manganese sulfate	1.0001
Nickel	50
Cast iron	60
Cobalt	60
Powdered iron	100
Machine steel	300
Ferrite (typical)	1,000
Permalloy 45	2,500
Transformer iron	3,000
Silicon iron	4,000
Iron (pure)	4,000
Mumetal	20,000
Sendust	20,000
Supermalloy	100,100

Tabela 4 – Permeabilidade magnética relativa.

7 ANEXO II

Descrição dos materiais utilizados na construção do resistor “shunt” e desenhos esquemáticos

	NOME	MATERIAL
PEÇA 1	Tubo do Elemento Resistivo de Aço Inox, Sustentado Internamente por Fenolite	Aço Inox
PEÇA 2	Tampa Superior Externa com Conector de Entrada	Alumínio
PEÇA 3	Tampa Inferior Externa	Alumínio
PEÇA 4	Tampa Superior Interna	Alumínio
PEÇA 5	Tampa Inferior Interna	Alumínio
PEÇA 6	Bolacha Isolante	PVC
PEÇA 7	Bolacha Isolante	PVC
PEÇA 8	Tubo Externo para Retorno da Corrente	Alumínio
PEÇA 9	Flange com Furos para Conector de Saída	Alumínio
PEÇA 10	Anel Isolante entre Peça 2 e Peça 8	“Teflon”
PEÇA 11	Conector BNC	Aço

Tabela 5 – Descrição de peças e materiais utilizados na construção do resistor “shunt”.

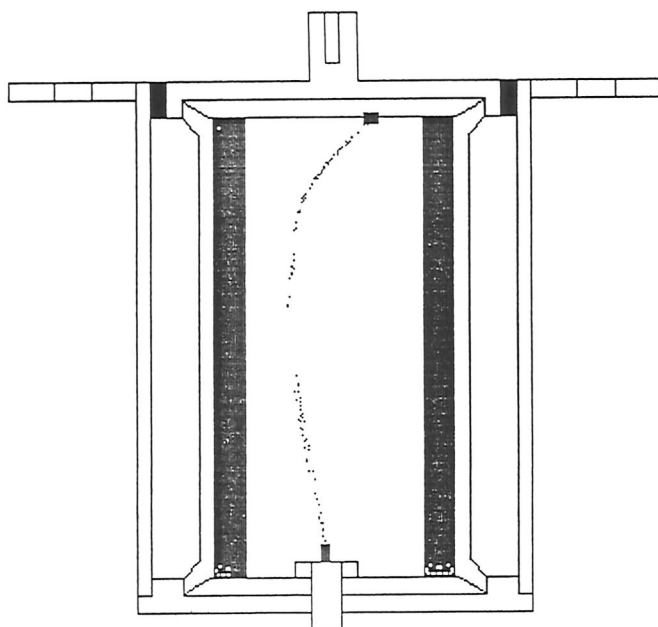
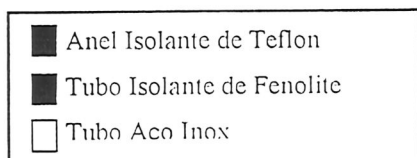


Fig. 28– Detalhe dos materiais usados na construção do “Shunt”

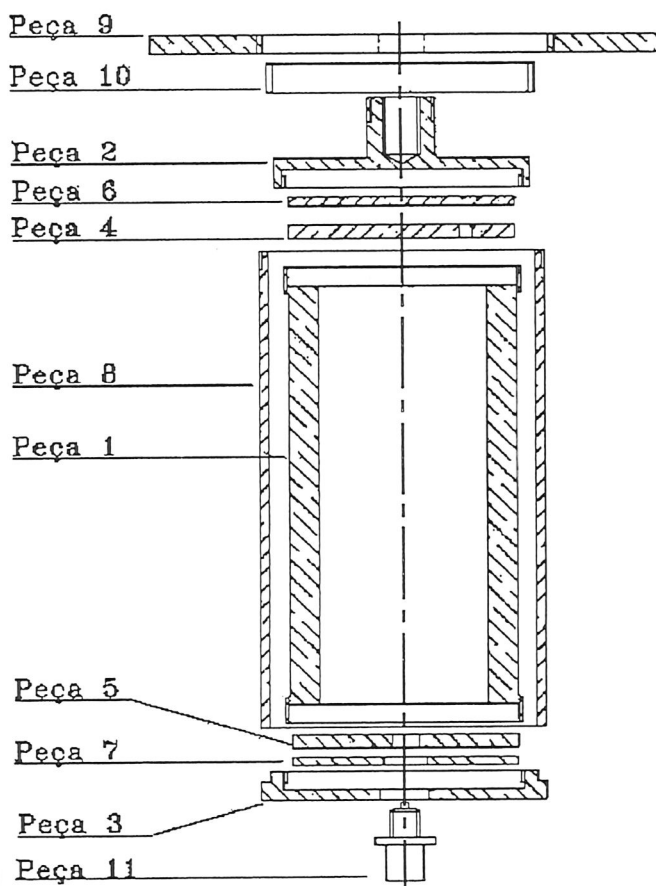


Fig. 29– Desenho explodido e em corte das peças do “Shunt” proposto.



Classificação de Segurança:	Documento n° DATNAS 001 / NT 003 / OR
Data: Novembro / 2001	Projeto DATNAS 001
Título: RESISTOR PARA MEDIÇÃO DE CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	
Título do projeto: DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS RELATIVOS A CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E SOBRETENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE MÉDIA TENSÃO	
Entidade executora: INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA / USP	
Resumo: Esta nota técnica descreve o princípio de funcionamento, a construção e as características de um resistor “<i>shunt</i>”, desenvolvido para medição de correntes oriundas de descargas atmosféricas. Observa-se que esse dispositivo mostrou-se extremamente adequado para medidas de correntes impulsivas de 2 kA a 100 kA, com respostas temporárias satisfatórias.	
Palavras-chave: - resistor <i>shunt</i>; - correntes impulsivas; - descarga atmosférica.	