Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 24 / 11 / 03

Ass.: Leandro Corioi

Alexandre Menezes de Camargo

**DESENVOLVIMENTO DE RESISTOR SHUNT PARA
MEDIDAS DE CORRENTES IMPULSIVAS EM ESPECIAL
PARA AQUELAS ORIUNDAS DE DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS**

DEDALUS - Acervo - EESC

31100044209

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim

**São Carlos
2003**

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ALEXANDRE MENEZES DE CAMARGO**

Dissertação defendida e julgada em 29-09-2003 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Tit. **RUY ALBERTO CORRÊA ALTAFIM (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **HEITOR CURY BASSO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **ALEXANDRE PIANTINI**
(Instituto de Eletrotécnica e Energia/IEE)

Aprovado

Prof. Assoc. **MURILO ARAUJO ROMERO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALVURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*À minha querida e amada esposa
Gabriele, e aos meus pais, Gilberto
e Alice; com amor, dedico este
trabalho.*

Agradecimentos

No decorrer do mestrado, pude contar com a preciosa ajuda de várias pessoas; agradeço de modo especial cada uma delas.

- A Deus, que tornou tudo possível.
- Meu orientador Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim, conselheiro e amigo nas horas mais difíceis e nunca mediu esforços para conclusão deste trabalho.
- Prof. Dr. Sartori, pela disposição e empenho empregado nos ensaios do resistor *shunt*, bem como pela amizade e conselhos.
- Prof. Dr. Geraldo, por tão gentilmente ter me conduzido a pós-graduação na USP.
- Prof. Veroneze
- Prof. Dr. Alexandre Piantini
- Eng.º Clóvis Kodaira, Acácio e Thaís, pela constante ajuda.
- Meus amigos de laboratório, Cacilda, Ricardo, Ermano, Anderson, Leandro e João Godoy.
- Aos funcionários: Ruy Berto, Marisa e Denise, sempre dispostos a ajudar.
- Departamento de Engenharia Elétrica de São Carlos da EESC-USP.
- Instituto de Eletrotécnica e Energia de São Paulo, IEE-USP.

Sumário

Capítulo 1

Introdução.....	1
-----------------	---

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Considerações Gerais.....	4
2.2 Bobina de Rogowski.....	5
2.3 Transformadores de Corrente.....	6
2.4 Resistores <i>Shunts</i>	8
2.4.1 Resistores Usados em Laboratórios.....	8
2.4.2 Resistores Usados em Campo.....	15

Capítulo 3

Desenvolvimento Teórico do Resistor <i>Shunt</i>	25
3.1 Circuito Equivalente do Resistor <i>Shunt</i>	25
3.2 Impedância em Baixas Frequências.....	28
3.2.1 Resistência de um Condutor Tubular.....	28
3.2.2 Indutância de um Condutor Tubular.....	30
3.3 Impedância em Frequências muito Altas.....	32
3.4 Capacidade Térmica do Elemento Resistivo.....	33
3.5 Influência das Resistências de Contato.....	35

Capítulo 4

Desenvolvimento do Resistor <i>Shunt</i>	37
4.1 Considerações Gerais.....	37
4.2 Cálculos Dimensionais do Resistor <i>Shunt</i>	39
4.2.1 Cálculo da Resistência em Baixas Frequências.....	39
4.2.2 Cálculo da Indutância em Baixas Frequências.....	40
4.2.3 Cálculo da Impedância em Frequências muito Altas.....	41
4.2.4 Cálculo da Capacidade Térmica do Elemento Resistivo.....	43
4.3 Descrição Construtiva do Resistor <i>Shunt</i>	44

Capítulo 5

Ensaio Realizados.....	49
5.1 Laboratório de Medidas e Padrões da EESC – USP.....	49
5.1.1 Materiais e Métodos.....	50
5.1.1.1 Medição da Resistência D.C.....	50
5.1.1.2 Resultados Obtidos nos Ensaio DC.....	50
5.1.1.3 Determinação da Impedância em Altas Frequências.....	51
5.1.1.4 Resultados Obtidos nos Ensaio em Altas Frequências.....	55
5.2 Laboratório do IEE – USP.....	56
5.2.1 Materiais e Métodos.....	57
5.2.2 Resultados Obtidos nos Ensaio.....	62

Capítulo 6

Conclusão.....	88
Referências bibliográficas.....	91
Apêndices.....	98

Lista de Figuras

Figura 2.1 Circuito de medição do sensor de corrente tipo bobina de Rogowski.....	6
Figura 2.2 Circuito de medição do transformador de corrente.....	7
Figura 2.3 Resistor <i>shunt</i> tubular coaxial.....	9
Figura 2.4 <i>Shunt</i> coaxial com medição de tensão independente.....	10
Figura 2.5 <i>Shunt</i> coaxial modificado por <i>loop</i> de compensação.....	11
Figura 2.6 Resistor feito de fios torcidos conectados em paralelo.....	11
Figura 2.7 Resistor feito com lâmina dobrada e isolada.....	12
Figura 2.8 Resistor <i>shunt</i> coaxial tipo “gaiola de esquilo”	13
Figura 2.9 Resistor <i>shunt</i> coaxial com caminho do circuito de tensão modificado.....	14
Figura 2.10 <i>Shunt</i> “gaiola de esquilo”	14
Figura 2.11 Resistor <i>shunt</i> coaxial com rasgos uniformes na superfície cilíndrica.....	15
Figura 3.1 Circuito equivalente do resistor <i>shunt</i> para altas correntes e baixos valores ôhmicos.....	26
Figura 3.2 Campo elétrico gerado por uma fonte de alta frequência.....	27
Figura 3.3 Condutor tubular.....	29
Figura 3.4 Sessão transversal do condutor coaxial.....	30

Figura 3.5 Resistências envolvidas na medição de corrente.....	35
Figura 3.6 Circuito equivalente para <i>shunt</i> de quatro terminais.....	36
Figura 4.1 Desenho esquemático do resistor <i>shunt</i> desenvolvido.....	37
Figura 4.2 Gráfico da variação da impedância com a frequência.....	42
Figura 4.3 Gráfico da variação da impedância com a frequência	42
Figura 4.4 Desenho expandido do resistor <i>shunt</i> coaxial desenvolvido.....	45
Figura 4.5 Fotos da várias partes do resistor <i>shunt</i> desenvolvido.....	47
Figura 5.1 Circuito de ensaio para medida de resistência	
elétrica do <i>shunt</i>	50
Figura 5.2 R_{Shunt} conectado ao dispositivo de acoplamento	52
Figura 5.3 Desenho esquemático em corte do dispositivo de acoplamento.....	52
Figura 5.4 Anel de 50Ω para calibração com carga do analisador de rede.....	53
Figura 5.5 Interface do Software de aquisição de dados.....	54
Figura 5.6 Vista geral da bancada de ensaios.....	55
Figura 5.7 Circuito de ensaio de impulso.....	58
Figura 5.8 Forma de onda padrão $8/20\mu s$	58
Figura 5.9 Montagem para o sistema de medição de corrente (SMC).....	59
Figura 5.10 Circuito e ensaio para correntes impulsivas.....	60
Figura 5.11 Exemplo de forma de onda.....	61
Figura 5.12 Exemplo de sobreposição.....	62

Figura 5.13 Valores de tensões medidas, aplicado impulso de	
3,45 kA (canal 1).	64
Figura 5.14 Valores de tensões medidas, aplicado impulso de	
3,45 kA (canal 2).....	65
Figura 5.15 Sobreposição das formas de ondas de 3,45 kA. (canal 1).....	66
Figura 5.16 Sobreposição das formas de ondas de 3,45 kA. (canal 2).....	67
Figura 5.17 Valores de tensões medidas, aplicado impulso de	
6,00 kA (canal 1).	68
Figura 5.18 Valores de tensões medidas, aplicado impulso de	
6,00 kA (canal 2).....	69
Figura 5.19 Sobreposição das formas de ondas de 6,00 kA (canal 1).....	70
Figura 5.20 Sobreposição das formas de ondas de 6,00 kA (canal 2).....	71
Figura 5.21 Valores de tensões medidas, aplicado impulso de	
11,70 kA (canal 1).....	72
Figura 5.22 Valores de tensões medidas, aplicado impulso de	
11,70 kA (canal 2).....	73
Figura 5.23 Sobreposição das formas de ondas de 11,70 kA. (canal 1).....	74
Figura 5.24 Sobreposição das formas de ondas de 11,70 kA. (canal 2).....	75
Figura 5.25 Valores de tensões medidas, aplicado impulso de	
20,60 kA (canal 1).....	76

Figura 5.26 Valores de tensões medidas, aplicado impulso de	
20,60 kA (canal 2).....	77
Figura 5.27 Sobreposição das formas de ondas de 20,60 kA. (canal 1).....	78
Figura 5.28 Sobreposição das formas de ondas de 20,60 kA. (canal 2).....	79
Figura 5.29 Valores de tensões medidas, aplicado impulso de	
37,74 kA (canal 1).....	80
Figura 5.30 Valores de tensões medidas, aplicado impulso de	
37,74 kA (canal 2).....	81
Figura 5.31 Sobreposição das formas de ondas de 37,74 kA. (canal 1).....	82
Figura 5.32 Sobreposição das formas de ondas de 37,74 kA. (canal 2).....	83
Figura 5.33 Valores de tensões medidas, aplicado impulso de	
41,55 kA (canal 1).....	84
Figura 5.34 Valores de tensões medidas, aplicado impulso de	
41,55 kA (canal 2).....	85
Figura 5.35 Sobreposição das formas de ondas de 41,55 kA. (canal 1).....	86
Figura 5.36 Sobreposição das formas de ondas de 41,55 kA. (canal 2).....	87

Lista de Tabelas

Tabela 4.1	Descrição de peças e materiais utilizados na construção do resistor <i>shunt</i>.....	48
Tabela 5.1	Valores medidos da resistência elétrica pelo método DC.....	51
Tabela 5.2	Valores medidos para impedância.com analisador de rede.....	56
Tabela 5.3	Comparação dos valores medidos e calculados para 55MHz.....	56
Tabela 5.4	Resumo dos dados obtidos nos ensaios de corrente impulsiva.....	63

Lista de abreviaturas e siglas

EESC-USP: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo;

IEE-USP: Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo;

CEMIG: Companhia Energética de Minas Gerais;

TC: Transformador de corrente;

R_{Shunt} : Resistor *shunt* desenvolvido;

$R_{Padrão}$: Resistor *shunt* padrão Haefely®;

SMC: Sistema de medição de corrente;

BNC: *Bayonet-Niell-Concelman Conector* – Conector para cabos coaxiais;

AM: Amplitude Modulada;

A.C.: Corrente alternada;

D.C.: Corrente Contínua;

Lista de símbolos

V :	tensão elétrica;
I :	corrente elétrica;
M :	indutância mútua;
Z	impedância;
R :	resistência elétrica;
R_0 :	resistência elétrica em baixas frequências;
R_s :	resistência superficial;
R_{AF} :	parcela resistiva da impedância em altas frequências;
ωL_{AF} :	reatância indutiva da impedância em altas frequências;
C :	capacitância;
L_0 :	indutância elétrica em baixas frequências;
t :	tempo;
e :	diferença de potencial no resistor;
E :	campo elétrico;
H :	intensidade magnética;
B :	campo indução magnética;
λ :	fluxo magnético concatenado;
δ :	profundidade de penetração pelicular;
μ :	permeabilidade magnética;

σ :	condutividade elétrica;
ρ :	resistividade elétrica;
f :	frequência;
A :	área da seção reta do tubo;
l :	comprimento do tubo;
r :	raio;
D :	diâmetro do tubo;
ep :	espessura da parede do tubo;
a :	raio interno do tubo resistivo;
b :	raio externo do tubo resistivo;
c :	raio interno do condutor de retorno de corrente;
d :	raio externo do condutor de retorno de corrente;
L_{int} :	indutância do tubo interno do <i>shunt</i> em baixas frequências;
L_{ar} :	indutância na região de ar entre os tubos do <i>shunt</i> ;
L_{ext} :	indutância do tubo externo do <i>shunt</i> em baixas frequências;
t_{apl} :	tempo de aplicação de corrente impulsiva;
W :	energia dissipada;
m :	massa;
k :	coeficiente térmico;
Vol :	volume de material do tubo resistivo;
γ :	densidade;

$\Delta\theta$:	aumento de temperatura;
R_{c1} :	resistência de contato do terminal 1 do resistor <i>shunt</i> ;
R_{c2} :	resistência de contato do terminal 2 do resistor <i>shunt</i> ;

Resumo

Este trabalho objetivou a construção de um resistor *shunt* dedicado a medir correntes impulsivas com valores de 2 kA a 100 kA. Esse resistor possui características gerais similares aos resistores *shunt* coaxiais convencionais descritos na literatura. No entanto, ele difere dos demais já desenvolvidos, por apresentar inúmeras inovações tecnológicas. Quando comparado com um resistor *shunt* Haefely® padrão, apresentou excelente estabilidade em toda a faixa de frequência requerida, até 10 MHz, bem como, excelente resposta temporal.

Abstract

The aim of this work was to construct a *shunt* resistor to measure impulsive currents with values from 2 kA to 100kA, with general features similar to conventional coaxial resistors as described in the literature. However, it differs from resistors already developed because it shows many offers technological innovations. When compared to a shoud stand Haefely® *shunt* resistor, it presented great stability in all required frequency band to 10 MHz, as well as excellent temporal response

Capítulo 1

Introdução

Em ensaios de laboratórios, o uso de resistores *shunt* como sensores de corrente impulsivas é de extrema importância na determinação de parâmetros relevantes, por exemplo: valor da amplitude da corrente, forma de onda, taxa de crescimento e carga elétrica total da corrente impulsiva associada, principalmente em ensaios de pára-raios de linha.

Outro aspecto interessante a ser considerado é a preocupação cada vez maior das concessionárias de energia elétrica em melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Estas empresas buscam cada vez mais identificar as causas de perturbações nos sistemas elétricos e estudar formas de minimização do problema. Neste contexto, com especial destaque aparecem as sobretensões provocadas por descargas atmosféricas, normalmente apontadas como responsáveis pela maior parte das interrupções não programadas das linhas de distribuição [1]. Desde 1920, foram desenvolvidos inúmeros sistemas para a medição de correntes oriundas de descargas atmosféricas [2, 3]. Dentre eles, um dos sistemas mais eficiente consiste na medição das correntes em torres captoras por resistores *shunt* ou por transformadores de impulso de corrente [4, 5, 6, 7 e 8].

Vários equipamentos são usados como sensor de corrente, em laboratório ou em campo, entretanto três desses desatacam-se: os transformadores de corrente, as bobinas de Rogowski e os resistores *shunt*.

No tocante aos resistores *shunt*, apesar de seu grande interesse tecnológico, a literatura disponível é deveras escassa; de onde vem a motivação deste trabalho, que emprega materiais não convencionais, geometrias simples, na busca do domínio dessa tecnologia.

Os resistores *shunt*, contudo, apresentam inúmeras exigências, dentre elas citam-se:

- suportar mecanicamente os efeitos térmicos e dinâmicos de correntes elevadas;
- possuir grande estabilidade térmica;
- não apresentar efeito de carga no sistema; e
- possuir baixa impedância e excelente resposta em frequência.

Procurando atender essas exigências nesta pesquisa, foi desenvolvido um resistor *shunt* para medição de correntes impulsivas com tecnologia nacional, tanto para uso em campo, quanto em laboratórios de altas correntes. Uma completa caracterização do resistor desenvolvido foi realizada, na busca de se determinar o seu comportamento frente as correntes impulsivas, em especial aquelas oriundas de descargas atmosféricas.

Os capítulos desta dissertação foram divididos como descrito nos parágrafos subsequentes.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da bibliografia, procurando apresentar os principais tipos de resistores desenvolvidos ao longo dos anos e suas principais características na medição direta de correntes impulsivas, quer no campo, quer em laboratório, onde muitas vezes sua utilização está associada a torres captoras e sistemas de aquisição de dados de descargas atmosféricas.

No capítulo 3 foram descritos os procedimentos teóricos necessários ao projeto do resistor desenvolvido. Esses procedimentos auxiliaram sobremaneira na definição da geometria e na escolha dos materiais envolvidos.

No capítulo 4, reside o cerne da dissertação. Ali encontram-se descritas todas as etapas tecnológicas para confecção do resistor *shunt*. Nesse capítulo procurou-se, também, ressaltar as inovações implementadas face aos dispositivos encontrados na literatura.

O capítulo 5 descreve os materiais e métodos envolvidos nos ensaios que foram executados no resistor *shunt* desenvolvido; nele também são apresentados os resultados obtidos nos vários ensaios realizados no Laboratório de padrões e medidas do departamento de Engenharia Elétrica de São Carlos (*EESC-USP*), e também os ensaios realizados no Instituto de Eletrotécnica e Energia (*IEE-USP*) de São Paulo.

O resistor *shunt* desenvolvido neste trabalho está em uso em um sistema de medição simultânea de correntes impulsivas oriundas de descargas atmosféricas e tensões induzidas em uma linha de distribuição, equipando uma torre isolada de captação com 60 metros de altura, localizada nas dependências do *IEE USP* na cidade de São Paulo.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Considerações Gerais

São muitos os dispositivos para medição de corrente elétrica: transformadores de corrente, transformadores de efeito hall, resistores *shunt*, sensores ópticos, bobinas de Rogowski, transdutores de corrente, entre outros. Entretanto, apenas alguns dispositivos são adequados para medição de altas correntes, devido aos grandes esforços mecânicos e térmicos que acompanham essas correntes. Um estudo preliminar mostrou que, para essas finalidades os mais adequados são: bobina de Rogowski, transformador de corrente e resistor *shunt* de alta capacidade.[9]

Neste capítulo, de forma sucinta são apresentados: o transformador de corrente e a bobina de Rogowski e com alguns detalhes, os principais resistores *shunt* já desenvolvidos. Também são apresentados vários resistores de medição que foram construídos com o objetivo específico de se medir correntes impulsivas em campo, oriundas de descargas atmosféricas.

2.2 Bobina de Rogowski

A bobina de Rogowski compõe-se de fios enrolados em um núcleo não magnético, normalmente o ar ($\mu = \mu_0$). Ao envolver um condutor cuja corrente se deseja medir, surge em seus terminais uma tensão induzida $V(t)$ expressa por:

$$V(t) = M \frac{dI(t)}{dt} \quad (2.1)$$

onde: M é a indutância mútua e $\frac{dI(t)}{dt}$ a variação da corrente no tempo. Desta forma, a corrente pode ser obtida pela expressão:

$$I(t) = \int dI(t) = \frac{1}{M} \int V(t) \cdot dt \quad (2.2)$$

Praticamente, para efetuar as medições, a seção transversal do núcleo é mantida constante, com os condutores enrolados perpendicularmente à sua linha central média. A integração da tensão induzida $V(t)$ pode ser feita por integradores eletro/eletrônicos ou por integração numérica em programas computacionais dedicados, após sua digitalização [10, 11].

Um exemplo de circuito de medição encontra-se ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Circuito de medição do sensor de corrente tipo bobina de rogowski [9]

No circuito da Figura 2.1, Z_0 é a impedância do cabo; R_T , um resistor de casamento de impedância e, R_I e C , respectivamente, os componentes resistivos e capacitivos do sistema integrador de sinais.

2.3 Transformadores de Corrente

Os transformadores de corrente (TC) têm sido largamente utilizados em medição de corrente, entretanto, uma das maiores preocupações com esse equipamento é a saturação de seu núcleo. Quando um TC tem seu núcleo saturado, os sinais do enrolamento secundário tornam-se distorcidos. Nesta situação, se por exemplo, o sinal de saída do TC estiver acoplado a relés de proteção, uma de suas principais aplicações, pode ocorrer falhas de operação com desastrosas conseqüências.

Uma importante característica dos TC é sua alta potência de saída (1A ou 5A na corrente secundária e dezenas ou centenas de VA), que o qualifica tanto para medição, quanto para acionamento de outros equipamentos.

Medições e simulações feitas em computador têm mostrado que erros no TC são pequenos na faixa de frequência de 1 Hz a vários kHz. Entretanto, nas medidas de correntes impulsivas a faixa de frequência envolvida pode alcançar 10MHz, o que fatalmente comprometeria a precisão da mediação [11].

Considerando o circuito equivalente de medição da Figura 2.2, observa-se que a corrente elétrica no enrolamento secundário relaciona-se à corrente no primário, por meio da equação 2.3 e a tensão de saída medida sobre o resistor R_T , pela equação 2.4.

$$i_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot i_1 \quad (2.3)$$

$$E_{RT} = i_2 \cdot \left(\frac{R_B \cdot R_T}{R_B + R_T} \right) = i_1 \cdot \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \cdot \left(\frac{R_B \cdot R_T}{R_B + R_T} \right) \quad (2.4)$$

Figura 2.2 - Circuito de medição do transformador de corrente[9].

2.4 Resistores Shunts

Resistores *shunts* são naturalmente lembrados quando se pensa em medidas de grandes correntes em geral. Porém, quando se trata de correntes impulsivas, que possuem frentes de onda muito íngremes e altas taxas de variação, devem ser tomados cuidados especiais. Devido aos altos valores dessas correntes, da ordem de dezenas ou mesmo centenas de kA, podem ser geradas altas temperaturas pelo aquecimento das partes resistivas do equipamento (efeito Joule), ou intensos esforços mecânicos nos condutores. Qualquer um desses dois efeitos pode inviabilizar o uso desses resistores, quando não considerados previamente.

2.4.1 Resistores Usados em Laboratório

No trabalho desenvolvido por Park [12], foi apresentada uma construção tubular coaxial para resistores *shunt*, dedicada a medições de correntes impulsivas até 200 kA. Também foram feitas comparações com resistores *shunt* dos tipos filamentar e laminar, quanto à estabilidade da impedância com a variação da frequência. Foram detalhados os materiais utilizados na construção de dois resistores *shunt* coaxiais, um deles com capacidade para medir correntes impulsivas de até 200 kA, com seu elemento resistivo feito em de liga de 80% Cu e 20% Ni. No outro resistor construído, com capacidade de até 50 kA, o tubo resistivo foi construído de Prata Alemã. Na Figura 2.3 é possível visualizar um resistor *shunt* tubular coaxial

Figura 2.3 - Resistor *shunt* tubular coaxial, onde: 1) terminal de conexão de corrente; 2) condutor tubular interno; 3) condutor tubular externo; 4) condutor para medição de queda de potencial ; 5) conector BNC para osciloscópio [12].

Nesse resistor a corrente a ser medida entra no resistor pelo terminal 1, flui através do cilindro resistivo interno 2 e retorna pelo cilindro condutivo externo 3.

A conexão 4 torna possível medir a queda de tensão que surge no cilindro resistivo, através conexão BNC-5. No espaço entre o condutor de ligação 4 e a parede do tubo interno, os campos magnéticos devido à corrente $i(t)$ são praticamente nulos, fazendo com que esta montagem apresente o comportamento de um resistor ôhmico puro. Na realidade, até mesmo esses resistores tubulares apresentam comportamento indutivo. Neste caso, a indutância intrínseca é basicamente determinada pelo efeito pelicular no cilindro interno [12].

Durnford e seus colaboradores [12], descreveram um *shunt* tubular coaxial, o qual foi usado com sucesso para medição de correntes impulsivas de até 466 kA. O resistor *shunt* construído e ilustrado na Figura 2.4 possuía um tubo resistivo construído com folha laminada de ferro, sustentado internamente por um tubo de baquelite impregnada. Esse tubo interno de baquelite fornecia sustentação mecânica para o tubo resistivo, além de suportar as forças resultantes provocadas pela passagem de correntes impulsivas.

Figura 2.4 - *Shunt* coaxial com medição de tensão independente dos terminais de corrente [12].

Outra característica importante desse resistor é o circuito de medição de tensão ser independente do circuito de corrente, sistema esse conhecido por medição a quatro terminais.

Um resistor *shunt* de diferente formato tubular foi usado por Stekolnikov em 1946 [12], para medição de correntes impulsivas de até 500 kA. Esse resistor não apresentava forma coaxial e conseqüentemente, a indutância externa do *shunt* era muito alta, comparada a outros resistores *shunt* de formato tubular coaxial, apresentados na mesma literatura [12].

Lago e colaboradores [13], aprimorando a forma coaxial do resistor *shunt* tubular proposta por Parker [12], desenvolveram um modelo no qual a medição da queda de tensão sobre o resistor teve seu circuito modificado por um *loop* de compensação. Segundo eles, esta modificação melhora o tempo de resposta do resistor, que é afetado pelo efeito pelicular. Na configuração proposta, o *loop* de compensação equivale a um terço do comprimento total do tubo resistivo que era de 99 cm, feito de cobre como mostrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 - *Shunt* coaxial modificado por *loop* de compensação no circuito de tensão [13].

Nos ensaios realizados levou-se em consideração uma entrada de corrente tipo degrau. Foram comparados os tempos de resposta para um resistor *shunt* coaxial convencional e o *shunt* modificado proposto. Nesses ensaios, conforme gráficos apresentados, o tempo de resposta comparado mostrou resposta mais próxima da ideal para o resistor *shunt* com o circuito modificado por um *loop*.

Há entretanto, outro tipo de *shunt*, usado por Bellaschi [12], Figura 2.6, no qual o efeito pelicular e a indutância, não são bem determinados.

Figura 2.6 - Resistor feito de fios torcidos conectados em paralelo; 1) fio torcido sem isolamento; 2) discos terminais de corrente em cobre; 3) terminal coaxial; 4) conector para terra; 5) anel isolante prensado entre os discos condutivos [12].

Esse resistor foi fabricado com fios torcidos conectados em paralelo. A corrente elétrica entra pelo conector 4, que está em contato com o disco superior, flui através do fio torcidos que estão ligados em paralelo até o conector de saída no disco inferior 2. Esses discos são isolados entre si através do isolante 5.

Outra configuração conhecida para resistores *shunt* apresentada por Silsbee [12], é a construção feita a partir de uma lâmina dobrada e isolada, mostrada na Figura 2.7. Essas duas últimas configurações apresentadas, são mais adequadas para medidas de correntes menores que 10 kA [12].

Figura 2.7 - Resistor feito com lâmina dobrada e isolada. Sistema de medição a 4 terminais [12].

Schwab em 1970 [14], apresentou modelos de circuitos equivalentes para resistor *shunt* do tipo tubular coaxial e tubular tipo “gaiola de esquilo”, considerando o efeito pelicular com a teoria baseada nos modelos de cabo de telégrafo. Uma ilustração desse tipo de construção para resistor *shunt* encontra-se na Figura 2.8.

Segundo esse autor, o resistor *shunt* tipo “gaiola de esquilo”, é indicado para aplicações de medições de correntes impulsivas que envolvem alta transferência de

energia e, conseqüentemente, necessitaria grande seção transversal do condutor tubular; entretanto, condutores com paredes muito espessas são mais susceptíveis a efeitos peliculares.

Figura 2.8 - Resistor *shunt* coaxial tipo "gaiola de esquilo" [18]

Em 1977, Malewski e colaboradores [19], propuseram uma construção modificada para resistores *shunt* coaxiais. Diferente dos resistores *shunt* já apresentados, nos quais o circuito de medição da queda de tensão sobre o resistor fica dentro do tubo resistivo, neste equipamento, parte desse circuito é colocado dentro da parede do tubo interno, como mostra a ilustração da Figura 2.9. Segundo os autores essa mudança oferece redução do tempo de resposta em até 10 vezes e preserva uma resposta normalmente conhecida.

Esse resistor foi usado para a medição de correntes de curto circuito de grandes geradores síncronos, que requerem rápida resposta dos *shunts* com capacidade térmica considerável e exige assim um grande volume de material resistivo com paredes tubulares muito espessas, o que não podia ser alcançado com as configurações convencionais de resistores.

Figura 2.9 - Resistor *shunt* coaxial com caminho do circuito de tensão modificado. 1) tubo interno; 2) tubo externo; 3) circuito de medição; 4) e 5) terminais de corrente; 6) terminal coaxial [15].

Em trabalhos mais recentes, Malewski e colaboradores, desenvolveram uma teoria para resistores *shunt* tubulares de paredes espessas; consideraram o efeito pelicular, e um melhor caminho para o circuito de medição de tensão, dentro da parede do elemento resistivo tubular. Também foram desenvolvidos resistores *shunt* da ordem de 1 ohm, do tipo “gaiola de esquilo”, no qual os elementos resistivos foram colocados em torno do perímetro cilíndrico. Esses resistores foram confeccionados de fios bobinados sobre material isolante [16, 17], conforme ilustrado na Figura 2.10

Figura 2.10 - *Shunt* “Gaiola de esquilo”. 1) conector para terra; 2) fio enrolado sobre tubo isolante; 3) terminal coaxial; 4) discos terminais de corrente em cobre; 5) condutor do circuito de tensão [17].

Nanduri em 1977 [18], desenvolveu um resistor *shunt* que tinha como inovação janelas no tubo resistivo. Essas aberturas ofereciam a vantagem de o caminho da corrente no elemento tubular, dividir-se em quatro caminhos paralelos e em ziguezague. Entretanto, em cada seção, o sentido da corrente era oposta à seção vizinha, formando assim um elemento não indutivo. Figura 2.11.

Figura 2.11 - Resistor *shunt* coaxial com rasgos uniformes na superfície cilíndrica dos tubos internos e externos [18].

Todos os resistores já mencionados neste capítulo são equipamentos desenvolvidos para medições e ensaios feitos em laboratório. Contudo, vários equipamentos de medição foram construídos com o objetivo específico de se medir correntes impulsivas em campo, oriundas de descargas atmosféricas.

2.4.2 Resistores Usados em Campo

Um estudo descrevendo diversas pesquisas envolvendo medições de correntes de descargas atmosféricas e de tensões induzidas em linhas de distribuição no período de 1982 a 2000 é apresentado em [19]. Um resumo desse estudo é

apresentado a seguir, onde são enfatizadas as pesquisas com maior relação com o presente trabalho.

Em pesquisas realizadas por Yokoyama e colaboradores [4], foram estudadas tensões induzidas em uma linha de distribuição devido à descargas atmosféricas, em região próxima ao litoral de Fukui, na costa oeste do Japão. Foram medidas simultaneamente, formas de onda e valores de pico de correntes associadas às descargas. Para tanto, foi utilizada uma torre com 200 m de altura, cujo topo foi equipado com um resistor *shunt*.

Alguns anos depois, em continuidade à pesquisa, Yokoyama e colaboradores [5] construíram outra torre de 150 m de altura a 200 m da linha experimental, também equipada com resistor *shunt*.

No trabalho realizado por Nakahori e colaboradores [6], foram utilizadas as mesmas estruturas utilizadas por Yokoyama e colaboradores [4 e 5]; no entanto, somente foram medidas, as formas de onda das correntes das descargas. Entre dezembro de 1980 e janeiro de 1981, foram observadas com sucesso 21 formas de onda de correntes de descargas, o que mostrou a eficiência e a aplicabilidade de resistores *shunts* nesse tipo de medição.

Em prosseguimento do trabalho, Yokoyama e colaboradores, de 1992 a 1996, observaram e analisaram dados de descargas atmosféricas: intensidade, desenvolvimento das descargas, campos eletromagnéticos, entre outros. Antes de 1994, para medir pequenas correntes, utilizava-se um resistor *shunt* de 25 m Ω . Após 1994, passou-se a usar resistor *shunt* de 10 m Ω . Atualmente usa-se resistor *shunt* de 2 m Ω [20].

Pesquisadores japoneses, liderados por Michishita [21], desenvolveram pesquisa sobre descargas atmosféricas e estudaram o comportamento de tensões induzidas em uma linha de distribuição, considerando finita a condutividade do solo. As medições foram obtidas durante o período de dezembro de 1993 a março de 1997. Neste caso as medições das correntes das descargas foram feitas com auxílio de um resistor *shunt* colocado no topo de uma torre de 200 m de altura. Em 1990, Goto e colaboradores [7], mediram as correntes das descargas atmosféricas com dois tipos de sistemas de medição. Um aspecto interessante nesta pesquisa é a ênfase dada às medições obtidas no inverno, estação na qual, no Japão, ocorrem muitas tempestades. As observações das descargas começaram no inverno de 1976 em uma torre isolada de 150 m de altura, localizada 125 m acima do nível do mar.

O primeiro sistema de medição, utilizado pela Companhia Elétrica de Tohoku, era composto por dois *shunts* coaxiais; um de $2\text{ m}\Omega$, localizado no captor tipo haste no topo da torre e o outro resistor de $4\text{ m}\Omega$, localizado no captor em forma de anel. Além dos *shunts*, o sistema era composto por conversores eletro/óptico, óptico/eletro, cabos de fibra ótica e registradores de transitórios controlados por computador.

Desenvolvido pela Universidade de Tohoku, o segundo sistema consistia de 5 bobinas de Rogowski, um integrador passivo R-C (constante de tempo t_c de 75 ms), conversores óticos, cabos de fibra ótica e registradores de transitórios controlados por computador. As bobinas de Rogowski foram instaladas em diferentes lugares na torre. Essas 5 bobinas foram conectadas a fim de se obter as correntes totais das

descargas incidentes na torre. Foram obtidas 105 descargas pelo sistema com *shunt* coaxial e 63 pelo sistema com bobina de Rogowski.

Os trabalhos realizados por Eriksson e colaboradores [22, 23] foram motivados pela necessidade de melhor compreensão do fenômeno das tensões induzidas provocadas por descargas atmosféricas, uma vez que elas causam faltas elétricas e danos nas linhas de distribuição. A pesquisa de sobretensões induzidas realizada na África do Sul, consistiu de uma linha de distribuição de 11 kV, com 9,9 km de comprimento, especialmente construída para essa pesquisa, aproximadamente a 30 km de Pretória.

Foram construídas duas estações de gravação, uma denominada NEERI localizada a 4,3km da extremidade aterrada da linha e outra denominada ESCOM localizada próxima à outra extremidade da linha.

A estação ESCOM foi equipada com um divisor de tensão e três transdutores de corrente. A principal função dessa estação era possibilitar a medição da corrente na linha, mas até a publicação do trabalho, ela não estava em pleno funcionamento [21].

Durante dois períodos de tempestades, de 01/09/78 a 31/03/79 e de 01/09/79 a 30/04/80, a estação NEERI operou por aproximadamente 500 horas durante 174 tempestades, tendo-se verificado densidade anual de descargas à terra de $6.5/\text{km}^2$. Foram gravadas aproximadamente 300 sobretensões maiores que 12kV e observadas mais de 20 descargas diretas na linha.

Em 1988, Geldenhuys e colaboradores [24], construíram uma estação de medição a 10 km de Pretória, com a finalidade de medir os parâmetros das descargas

atmosféricas: forma de onda da corrente, valor de crista, duração e outros. Para realizar essas medições, foi construído um mastro de 60 m de altura, colocado em uma elevação do terreno de aproximadamente 80 m. O mastro, treliça de alumínio, foi fixado ao chão por meio de quatro isoladores em uma base e por estais isolantes. Sob a base isolada foi colocado o sistema para medição da corrente da descarga.

Os instrumentos de medição foram colocados em uma cabine situada a 10 m de distância da base da torre construída como uma “gaiola de Faraday”, que era ligada à base da torre por uma conexão única de baixa impedância. Antes que a corrente elétrica da descarga atmosférica chegasse a terra, passava por um transformador de corrente de banda larga, onde eram gravados por um sistema digital de aquisição de dados, totalmente automatizado.

Outros três sistemas de gravação foram utilizados para dar informações adicionais e prover um *back-up*, caso o sistema primário de medição sofresse alguma falha. Esses sistemas eram:

- a) Um centelhador que isolava o mastro de terra, fazendo com que a corrente elétrica da descarga passasse necessariamente por ele, produzindo marcas inconfundíveis de arco nos eletrodos de bronze;
- b) elos magnéticos que foram instalados no mastro para medir a polaridade e o pico de corrente da descarga com precisão de 10 % aproximadamente; e
- c) um gravador digital alimentado por baterias.

Torres e colaboradores [25, 26], entre 1994 e 1996, realizaram estudos para caracterização dos parâmetros de descargas atmosféricas na Colômbia. Foram obtidos: a densidade de descargas para terra e o mapa do nível cerâmico. Assim

como o Brasil, a Colômbia também é um país localizado na zona tropical, com grande atividade elétrica atmosférica. O projeto tinha como objetivos medir e, no tempo e no espaço, fazer análise estatística dos parâmetros das descargas e sua influência no sistema de potência da Colômbia, bem como analisar os possíveis danos em equipamentos eletrônicos.

Para complementar a caracterização dos parâmetros das descargas, Torres e seus colaboradores [27], fizeram medições das correntes das descargas. A torre construída com 30m de altura, era do tipo estaiada, como rádio AM, com estais fabricados com material isolante. Na base da torre, em formato piramidal, localizava-se o equipamento transdutor. Além disso, nessa base foram colocados isoladores poliméricos que isolavam a parte metálica da estrutura da terra. Os equipamentos selecionados para determinar os parâmetros das descargas eram: bobina de Rogowski diferenciadora, bobina de Rogowski integradora e um resistor *shunt*. Esses três equipamentos foram instalados junto ao transformador de corrente Eletrônico Pearson, modelo 1423.

No ano de 1970, a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) começou um programa de pesquisas na área de descargas atmosféricas que perdura até hoje [28], com o objetivo de obter parâmetros das descargas atmosféricas. Em 1971 teve início um trabalho para se obtenção de um mapa do nível cerâmico do estado de Minas Gerais. Em 1984, nesse estado foi instalado um sistema de localização de descargas

A CEMIG, desde 1985, faz a medição das correntes das descargas atmosféricas [29]. Foi construído um mastro de 60 m de altura no Morro do

Cachimbo a 15 km de Belo Horizonte, que se localiza a uma altura de 200 m acima dos terrenos circunvizinhos. O mastro, sustentado por estais, é fabricado com um material isolante chamado *nylon terylene*, para que a corrente da descarga flua completamente através do mastro. A base do mastro é suportada por isoladores. As correntes das descargas fluem pelo mastro e, através de um *gap*, passam para um transformador de corrente calibrado para correntes de até 200 kA. Os sinais são transmitidos até a cabine de instrumentos, através de cabos envolvidos em tubos de blindagem.

Os sinais provenientes do transformador de corrente são digitalizados por osciloscópio e transferidos um microcomputador. A expectativa inicial de incidência era de 5 a 8 descargas por ano. De novembro de 1985 a janeiro de 1994 foram registradas 63 descargas incidentes no mastro.

Diendorfer e colaboradores [30] em 2000, na Áustria, também apresentaram medições de correntes elétricas das descargas atmosféricas. Um recente trabalho sobre investigação da densidade de descargas atmosféricas próximas a objetos altos nesse país, indicou o local escolhido; uma torre de telecomunicações de aproximadamente 100 m de altura, foi situada no monte Gaisber, a uma altitude de 1287 metros a aproximadamente 5km de Salzburg. Para esse local havia a expectativa de 40 a 50 descargas diretas por ano.

Foi construída uma sala próxima à torre para abrigar os instrumentos de medição da corrente, e no topo da torre, foi instalada uma haste para descargas atmosféricas. A corrente foi medida na base da haste, por meio de um *shunt* com resistência de $0,25\text{m}\Omega$ e largura de banda de 0 a 3,2 MHz.

Outro estudo semelhante ao anteriormente descrito foi realizado na montanha de Hoher Peissenberg, no sul da Alemanha, e apresentado por Fuchs e colaboradores [31]. Com duas estações de medição sincronizadas, o trabalho consistiu em medir a corrente elétrica dos raios incidentes em uma torre, bem como os campos eletromagnéticos próximos ao local da descarga. A estação utilizada para medição da corrente elétrica foi colocada sob a base da torre e a estação de medição dos campos eletromagnéticos, denominada LEMP, foi posicionada a 189 m da torre.

Na estação de medição de corrente foram gravadas as formas de onda das correntes e suas derivadas em relação ao tempo. O sistema de medição de corrente foi instalado em uma cabine blindada na base da torre. Os sinais provenientes de equipamentos do topo e da base da torre, eram levados para o sistema de aquisição de dados. As formas de onda das correntes das descargas no topo da torre foram medidas por meio de um transformador de corrente Pearson (tipo 2093). O transformador possuía relação de 0,001 V/A e largura de banda de 0,15 Hz a 200 kHz, a qual determinava a largura de banda do sistema de medição. Essa largura de banda do sistema permitiu boa medição de correntes tanto em baixas como em altas frequências.

As derivadas das correntes no tempo foram medidas utilizando-se uma bobina colocada próximo ao captor. A bobina tinha indutância mútua de aproximadamente 13 nH e limite superior na largura de banda de 20 MHz. Na base da torre, a forma de onda da corrente impulsiva foi medida por meio de uma bobina retangular com dimensões de 30cm x 40cm, feita com cabos de cobre de 10 mm de diâmetro. O campo magnético irradiado durante o raio induz uma corrente na bobina. Essa

corrente, proporcional à corrente do raio, foi medida por meio de um transformador de corrente. Dessa forma a tensão de saída era proporcional à corrente na base da torre. Esse transformador de corrente mantinha relação de 0,01V/A e largura de banda de 2Hz a 300MHz. A bobina tinha indutância própria de 0,968 μ H, e o sistema completo de medição de corrente na base da torre largura de banda de 10 Hz a 20MHz.

A corrente da descarga era gravada com intervalo de amostragem de 1 μ s e gravação com duração de 1s nos dois canais do osciloscópio, um canal para valores baixos de amplitude e outro canal para altos valores de amplitude.

O sistema de aquisição de dados funcionava automaticamente. A corrente da descarga “disparava” os osciloscópios; o computador lia os dados de todos os osciloscópios, gravava-os no disco rígido e “armava” todos os osciloscópios novamente.

O trabalho de Barker e colaboradores [32], publicado em 1996, apresenta medições simultâneas de tensões induzidas e de campos elétrico e magnético devidos à descargas artificialmente provocadas por foguetes, e apresenta também, medidas da forma de onda da corrente da descarga. O objetivo precípua do trabalho, apoiado pelo EPRI, era obter dados para aperfeiçoar algoritmos de cálculo de descargas disruptivas em linhas de distribuição devido à descargas atmosféricas.

As descargas eram provocadas por meio do disparo de foguetes, que arrastavam um fio de cobre de 0,2 mm de diâmetro. Quando o foguete atingia altura suficiente, era provocada uma descarga, vaporizando o fio. As descargas iniciais resultantes não eram consideradas, aproveitando-se os resultados referentes às

descargas subseqüentes, bem depois da vaporização do fio. Para estudo das tensões induzidas, foi construída uma linha experimental de 682m.

A corrente da descarga era medida por meio de transformadores de banda larga e *shunts* de corrente localizados no lançador dos foguetes. A corrente no lançador, provocada pelo foguete, passava através desses equipamentos antes de atingir a terra. Foram usados registradores de transitórios provocados por descargas (LTRs) e osciloscópios digitais modelos LeCroy 9314 e Nicolet Pro-90, para gravar os sinais dos transformadores e *shunts*.

Os resultados obtidos correspondem a 63 conjuntos de tensões, na faixa de 8 kV a 100 kV, e correntes de retorno, entre 4 kA e 44 kA. Os valores de crista das tensões resultaram proporcionais às amplitudes das correntes, havendo também, certa correlação entre as amplitudes das tensões e a taxa de crescimento (kA/ μ s) da corrente da descarga.

Capítulo 3

Desenvolvimento Teórico do Resistor Shunt

3.1 Circuito Equivalente do Resistor Shunt

Resistores *shunt* podem ser representados por uma impedância com parcela resistiva e indutiva, tal como mostrado na Figura 3.1. Isto porque, para resistores com baixos valores ôhmicos e submetidos a valores elevados de corrente, as indutâncias intrínsecas tornam-se não desprezíveis, devido principalmente ao efeito pelicular [16]. Desta forma, a queda de tensão $e(t)$ em função da corrente $I_0(t)$ medida sobre a impedância pode ser calculada pela equação 3.1, ou

$$e(t) = R_0 I_0(t) + L_0 \frac{dI_0(t)}{dt} \quad (3.1)$$

onde: R_0 , e L_0 , são respectivamente a resistência e a indutância do *shunt*.

Como a indutância intrínseca L_0 , introduz sérias distorções nas formas de ondas à serem medidas, ela deve ser a menor possível. Esta condição de baixo valor indutivo é alcançada pelo resistor *shunt* coaxial, no interior do qual o campo magnético é praticamente nulo, quando uma distribuição de corrente uniforme flui através de seu elemento resistivo.

Figura 3.1 – Circuito equivalente do resistor shunt, para altas correntes e baixos valores ôhmicos.

Entretanto, até mesmo esses resistores tubulares apresentam comportamento indutivo. Neste caso, a indutância intrínseca está fortemente associada ao efeito pelicular do cilindro interno, como demonstraram vários autores [13, 14 e 16].

No cálculo da componente indutiva, é interessante considerar uma explicação física do decaimento dos campos e da corrente devido ao efeito pelicular, conforme se caminha em direção ao centro do condutor.

Imaginando uma fonte de alta frequência como na Figura 3.2, que produz um campo elétrico $\vec{E}_0$ aplicado na vizinhança do condutor. Isto deve causar fluxo de corrente no condutor, o qual produz um campo magnético $\vec{B}$ perpendicular ao campo elétrico $\vec{E}_0$. Este campo magnético variável produz um campo elétrico $\vec{E}'$ induzido, oposto a $\vec{E}_0$. Um estudo das duas integrais de linha fechada, 1-2-3-4-1 e 1'-2'-3'-4'-1, verifica que uma quantidade maior de linhas de fluxo magnético é “abraçada” pelo último caminho, de modo tal que a tensão induzida ao redor desse

caminho é maior, e pode-se deduzir que o campo induzido ao longo de 2'-3' é maior que ao longo de 2-3.

Figura 3.2 – Campo elétrico gerado por uma fonte de alta frequência aplicado a um condutor

Assim o campo resultante $\vec{E}_0 - \vec{E}'$ é menor para produzir fluxo de corrente, quando maior for a distância na direção ao interior do condutor [33]. Essa situação caracterizada anteriormente é conhecida como profundidade de penetração, e está indicada na Figura 3.2 como δ . É importante salientar que:

- a) a profundidade de penetração δ será tanto menor quanto mais altas forem a condutividade, a permeabilidade e a frequência, uma vez que ela é inversamente proporcional à raiz quadrada de cada uma delas, conforme equação 3.2.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (3.2)$$

onde: σ é condutividade elétrica, μ é a permeabilidade magnética e f é a frequência

- b) Quando maior for a distância na direção do interior do condutor, menor a intensidade dos campos e a densidade de corrente que diminuem exponencialmente. Essa diminuição não deixa de ocorrer; abaixo do valor calculado para δ , este é simplesmente o ponto em que eles diminuíram a $1/e$ (cerca de 36,9 %) de seus valores na superfície.

3.2 Impedância em Baixas Frequências

Neste tópico são calculadas as parcelas resistiva e indutiva da impedância em baixa frequência. No caso da parcela resistiva somente é considerado o condutor tubular interno do resistor shunt coaxial, isto porque, o condutor externo, normalmente confeccionado com bom condutor, tem resistência elétrica à passagem da corrente elétrica desprezível, podendo ser desconsiderado. Já no caso da parcela indutiva, serão considerados os enlaces de fluxo por unidade de corrente em três regiões; no interior do condutor interno, no espaço de ar entre os condutores e no interior do condutor externo.

3.2.1 Resistência de um Condutor Tubular

Em frequências muito baixas, a corrente apresenta distribuição uniforme ao longo da seção transversal do condutor, portanto, para cálculo da resistência de um condutor tubular, pode-se aplicar a fórmula da resistência em corrente contínua.

O valor da parte resistiva R_0 da impedância em baixas frequências é calculado a partir da configuração geométrica do tubo e resistividade ρ , na equação 3.3:

$$R_0 = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (3.3)$$

onde: l é o comprimento do tubo, ρ é a resistividade do material e A é área da sessão reta do tubo.

A área da sessão reta transversal é mostrada na Figura 3.3 e pode ser calculada através da equação 3.4

$$A = \pi \cdot (r + ep)^2 - \pi \cdot r^2 \quad (3.4)$$

Figura 3.3 – Condutor tubular. Onde: ep é a espessura da parede, l é o comprimento do tubo e r é o raio

Assim, através das equações 3.3 e 3.4 é possível obter a equação 3.5, ou seja:

$$R_0 = \rho \cdot \frac{l}{\pi \cdot ep \cdot D} \quad (3.5)$$

que expressa o valor da resistência elétrica de um condutor tubular, com diâmetro muito maior que a espessura da parede do condutor ($D \gg ep$).

3.2.2 Indutância de um Condutor Tubular

O cálculo da indutância L_0 por unidade de comprimento de um condutor coaxial, como mostrado na Figura 3.4, pode ser obtido das equações 3.6 e 3.7, que envolve o fluxo concatenado λ e uma corrente I_0 uniformemente distribuída nos condutores interno e externo, ou:

$$\lambda = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (3.6)$$

$$L_0 = \frac{\lambda}{I_0} \quad (3.7)$$

Figura 3.4 – Sessão transversal do condutor coaxial

Para sessão coaxial idealizada na Figura 3.4, com uma corrente axial I_0 , que entra pelo condutor interno e retorna pelo externo, o campo magnético gerado é radial, e variável com o raio da linha. Portanto, considera-se três situações distintas para um caminho circular fechado l de raio r que pode variar desde $r = 0$ até $r = d$, ou seja:

- Para $r < a$ não há campo magnético, pois a linha fechada não concatena corrente alguma nessa região. E portanto, tem-se:

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0$$

$$\therefore H = 0 \quad B = 0 \quad (3.8)$$

- Para $a \leq r \leq b$, que pertence a região dentro do condutor tubular interno tem-se o fluxo λ_{int} e conseqüentemente a indutância L_{int} dado respectivamente pelas equações 3.9 e 3.10.

$$\lambda_{int} = \frac{\mu \cdot I_0}{2 \cdot \pi \cdot (b^2 - a^2)^2} \cdot \int_a^b \frac{(r^2 - a^2)^2}{r} \cdot dr \quad (3.9)$$

$$L_{int} = \frac{\lambda_{int}}{I_0} = \left(\frac{a^4 \cdot \mu \cdot \ln(a)}{2 \cdot \pi \cdot (a^2 - b^2)^2} + \frac{a^4 \cdot \mu \cdot \ln(b)}{2 \cdot \pi \cdot (a^2 - b^2)^2} + \frac{\mu \cdot (3 \cdot a^2 - b^2)}{8 \cdot \pi \cdot (a^2 - b^2)} \right) \quad (3.10)$$

- Para $b \leq r \leq c$, que pertence à região entre os condutores interno e externo, tem-se o fluxo λ_{ar} e a indutância L_{ar} dado por:

$$L_{ar} = \frac{\lambda_{ar}}{I_0} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{c}{b}\right) \quad (3.11)$$

- Para $c \leq r \leq d$, que pertence a região dentro do condutor tubular externo, tem-se o fluxo λ_{ext} e conseqüentemente a indutância L_{ext} dado por:

$$\lambda_{ext} = \frac{\mu \cdot I_0}{2 \cdot \pi \cdot (d^2 - c^2)^2} \cdot \int_c^d \frac{(d^2 - r^2)^2}{r} \cdot dr \quad (3.12)$$

$$L_{ext} = \frac{\lambda_{ext}}{I_0} = \left(\frac{d^4 \cdot \mu \cdot \ln(c)}{2 \cdot \pi \cdot (c^2 - d^2)^2} + \frac{d^4 \cdot \mu \cdot \ln(d)}{2 \cdot \pi \cdot (c^2 - d^2)^2} + \frac{\mu \cdot (c^2 - 3 \cdot d^2)}{8 \cdot \pi \cdot (d^2 - c^2)} \right) \quad (3.13)$$

A indutância L_0 , por unidade de comprimento, resulta da superposição das três indutâncias, calculadas nas equações 3.10, 3.11 e 3.13, ou seja:

$$L_0 = L_{int} + L_{ar} + L_{ext} \quad (3.14)$$

A equação 3.14 pode ser considerada como caso limite da análise em A.C. para baixas frequências, no qual a distribuição de corrente ainda pode ser considerada uniforme, em toda a secção reta transversal do condutor tubular. O resultado dessa equação é usado para se determinar a indutância do condutor tubular do resistor *shunt* desenvolvido.

3.3 Impedância em Frequências muito Altas

A solução exata para determinar a impedância de um condutor tubular, considerada a distribuição não uniforme da corrente, pode ser encontrada pelas funções de Bessel [14 e 15]. Entretanto, no desenvolvimento deste trabalho, em que a espessura da parede é bastante pequena comparada ao raio do condutor, foi proposta a aplicação da análise de um condutor plano e achatado de espessura finita. Esta análise está totalmente descrita em [33], para um condutor tubular que satisfaz as condições de espessura da parede pequena comparada ao raio do tubo. Esses resultados, mostrados nas equações 3.15 e 3.16, podem ser diretamente usados para fornecer a resistência (R_{AF}) e reatância indutiva (ωL_{AF}) por unidade de comprimento dividida pela circunferência.

$$R_{AF} \approx \frac{R_s}{2 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left[\frac{\sinh\left(\frac{2 \cdot ep}{\delta}\right) + \sin\left(\frac{2 \cdot ep}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{2 \cdot ep}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2 \cdot ep}{\delta}\right)} \right] \quad (3.15)$$

$$\omega L_{AF} \approx \frac{R_s}{2 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left[\frac{\sinh\left(\frac{2 \cdot ep}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{2 \cdot ep}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{2 \cdot ep}{\delta}\right) - \cos\left(\frac{2 \cdot ep}{\delta}\right)} \right] \quad (3.16)$$

onde: b é o raio externo; ep a espessura da parede, e R_s a resistência do condutor, também chamada resistividade de superfície.

Tal como a profundidade de penetração δ , a resistência superficial, R_s , definida na equação 3.17, também pode ser um parâmetro útil na análise de condutores.

$$R_s = \frac{1}{\sigma \cdot \delta} = \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu}{\sigma}} \quad (3.17)$$

3.4 Capacidade Térmica do Elemento Resistivo

Quando se trabalha com correntes na ordem de dezenas de quilo-ampéres, uma das maiores preocupações é justamente o fator térmico. Este requisito impõe, além da baixa resistividade, que o elemento resistivo seja suficientemente robusto para suportar as altas temperaturas geradas, quando da passagem das altas correntes elétricas.

Este problema pode ser traduzido na escolha do material adequado para suportar uma dada quantidade de energia sem que o elemento resistivo venha a ser danificado, considerando-se desprezíveis os efeitos de troca de calor com o meio por

convecção e irradiação de calor nos tempos de aplicação de corrente envolvidos na medição, que são da ordem de microssegundos.

Primeiramente, torna-se necessário estimar a quantidade de energia que será dissipada nas piores condições de uso do resistor. Isto se faz conhecendo as máximas correntes elétricas envolvidas e, também, os tempos de aplicação. A energia pode, então, ser calculada pela expressão:

$$W = R_0 \cdot I_0^2 \cdot t_{apl} \quad (3.18)$$

onde: I_0 é a corrente, R_0 a resistência do Shunt e t_{apl} o tempo de aplicação.

Com a equação 3.18 e escolhido o material, pode-se calcular o aumento da temperatura do elemento resistivo, pela equação 3.19.

$$R_0 \cdot I_0^2 \cdot t_{apl} = m \cdot k \cdot \Delta\theta \quad (3.19)$$

onde: m é a massa do resistor, k é o coeficiente térmico do material e $\Delta\theta$ é a variação térmica.

A massa m pode ser determinada na equação 3.20, conhecendo-se; a densidade do material, γ e o volume calculado na equação 3.21, ou seja:

$$m = Vol \cdot \gamma \quad (3.20)$$

$$Vol = \pi \cdot (b^2 - a^2) \cdot l \quad (3.21)$$

onde: l é o comprimento do resistor, a o raio interno do tubo resistivo e b o raio externo do tubo resistivo.

3.5 Influência das Resistências de Contato

Devido à baixa resistência do resistor *shunt*, surge uma dificuldade de medição das correntes impulsivas: a resistência de contato. Essa resistência, em algumas situações, pode atingir valores de maiores que o próprio valor de resistência do *shunt*, como aquela mostrada na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Resistências envolvidas na medição de corrente: R_0 - resistor *shunt*, R_{c1} e R_{c2} resistência de contato dos terminais 1 e 2 respectivamente.

Essa variação da resistência do resistor *shunt* não chega a causar problemas de interferência com a fonte do sinal, pois a resistência total ($R_0 + R_{c1} + R_{c2}$) ainda é muito pequena e não causa diminuição significativa no valor da corrente impulsiva. No entanto, haverá erros se a diferença de potencial $e(t)$ medida, for usada para se obter o valor da corrente I_0 com base na equação 3.1. Exemplificando para regime D.C., tem-se a diferença de potencial e entre os dois terminais igual à:

$$e = (R_0 + R_{c1} + R_{c2}) \cdot I_0 \quad (3.22)$$

O valor da constante que relaciona I_0 com e não apenas é desconhecido, como também variável, alterando-se a cada montagem ou com o tempo.

Para solucionar esse problema, é necessário que os terminais de corrente sejam separados dos terminais de medição da queda de potencial, tal como apresentado na Figura 3.6, denominado medição de corrente com 4 terminais.

Figura 3.6 - Circuito equivalente para *shunt* de 4 terminais, incluindo: resistências de contato (R_{c1} , R_{c2}) e resistências próprias do *shunt* R_0 .

Deste modo, de acordo com o diagrama da Figura 3.6, a corrente é injetada entre os terminais 1 e 2 e a tensão e medida entre os terminais 3 e 4 não compartilha os mesmos pontos de contato. Com isso o valor da diferença de potencial medida não depende dos valores dos resistores R_{c1} e R_{c2} . Assim, a equação que relaciona a tensão e a corrente para regime D.C. será:

$$e = R_0 \cdot I_0 \quad (3.23)$$

Ou seja, neste caso temos a medição de uma tensão que é proporcional à corrente que está sendo medida, independente dos valores das resistências de contato no circuito.

Capítulo 4

Desenvolvimento do Resistor *Shunt*

4.1 – Considerações Gerais

Aparentemente, o Resistor *shunt* desenvolvido (R_{shunt}) apresenta características gerais similares aos resistores *shunt* coaxiais convencionais; entretanto ele possui inúmeras inovações tecnológicas. Seu desenvolvimento esquemático completo encontra-se ilustrado na Figura 4.1 e um desenho expandido em corte, na Figura 4.4.

Figura 4.1 - Desenho esquemático do resistor *shunt* desenvolvido

Como primeira inovação, cita-se seu elemento resistivo, completamente diferente dos convencionais, compostos de ligas de Níquel, Cromo e Ferro [28 e 34]. Neste trabalho, foi desenvolvido o elemento resistivo 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 [35, 36 e 37]. Esta última característica mostrou-se decisiva no seu desenvolvimento, tendo em vista as altas correntes impulsivas que este equipamento se propõe a medir, com valores de crista de 2 kA a 100 kA e tempos da ordem de dezenas de microssegundos. Neste caso, para que fosse conseguido o valor ôhmico em torno de 3 m Ω , desejado para medir essas correntes, foi necessário usar o elemento resistivo tubular com espessura reduzida em torno de décimos de milímetro. Tubos com paredes tão finas praticamente não apresentam resistência mecânica e, para serem usinados, necessitam de artifícios tecnológicos. Neste caso, a usinagem de uma parede de 0,15 mm só foi possível após o elemento resistivo de aço inox ter sido introduzido em um tubo de fenolite. A espessura diminuta da parede do elemento resistivo também se mostrou essencial para redução da indutância intrínseca, evitando aumento de efeitos indesejáveis como, por exemplo, o efeito eletromagnético pelicular.

Outra importante inovação tecnológica foi a simples colocação de duas peças isolantes, indicadas no desenho da Figura 4.4 como peças 6 e 7, para eliminar resistências de contato na medida de tensão. Cabe ressaltar aqui que com essa inovação, no resistor tubular desenvolvido, a medição da tensão pôde ser feita por um terminal separado dos conectores de corrente, similar ao sistema de quatro eletrodos para medidas de resistências elétricas de baixo valor ôhmico, descrito no item 3.5.

Como característica relevante do R_{shunt} destaca-se, também, o cilindro externo condutivo de alumínio, peça 8 da Figura 4.4. Essa peça apresenta duas importantes

funções: uma de elemento condutor da corrente de retorno, que faz do resistor um equipamento coaxial livre de interferências eletromagnéticas externas; e outra, proteger o elemento resistivo contra danos mecânicos.

4.2 Cálculos Dimensionais do Resistor Shunt

Os cálculos inicialmente feitos para construção do R_{shunt} detiveram-se na determinação da resistência D.C. do elemento resistivo e no cálculo de sua indutância. Para tanto foram utilizadas as equações, descritas no capítulo 3. Também foram feitos cálculos para avaliar a capacidade térmica do tubo, porque é esta uma das maiores preocupações quando se trabalha com correntes na ordem de dezenas de quilo-ampéres.

Finalizando, o projeto do resistor *shunt* foi direcionado para: um elemento com baixa resistência elétrica; alta capacidade térmica; e para que causasse o mínimo de interferência no circuito onde fosse instalado.

4.2.1 Cálculo da Resistência em Baixas Frequências

Com a equação 3.5, e os valores da resistividade ρ de $7,8 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$, do comprimento l de $108,80 \cdot 10^{-3} m$, da espessura ep de $0,15 \cdot 10^{-3} m$ e do diâmetro externo D de $57,70 \cdot 10^{-3} m$, tem-se uma resistência igual à:

$$R_0 = 3,12 \text{ m}\Omega \quad (4.1)$$

4.2.2 Cálculo da Indutância em Baixas Frequências

O cálculo da indutância L_0 , para condutor coaxial é obtido a partir da equação 3.14 aplicando-se os resultados das equações 3.8, 3.10, 3.11 e 3.13, que envolvem o fluxo concatenado λ e uma corrente I_0 uniformemente distribuída nos condutores interno e externo do R_{shunt} , ou seja:

- Para $a \leq r \leq b$, que pertence à região dentro do condutor tubular interno, tem-se a indutância L_{int} , vezes o comprimento l do tubo, dado por:

$$L_{int} = \frac{\lambda_{int} \cdot l}{I_0} = \left(\frac{a^4 \cdot \mu \cdot \ln(a)}{2 \cdot \pi \cdot (a^2 - b^2)^2} + \frac{a^4 \cdot \mu \cdot \ln(b)}{2 \cdot \pi \cdot (a^2 - b^2)^2} + \frac{\mu \cdot (3 \cdot a^2 - b^2)}{8 \cdot \pi \cdot (a^2 - b^2)} \right) \cdot l \quad (4.2)$$

sendo: $a = 28,70 \cdot 10^{-3}$ m; $b = 28,85 \cdot 10^{-3}$ m; $\mu = 300 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m; e o comprimento do tubo $l = 108,80 \cdot 10^{-3}$ m, tem-se:

$$L_{int} = 1,131 \cdot 10^{-8} \quad \text{H} \quad (4.3)$$

- Para $b \leq r \leq c$, que pertence à região entre os condutores interno e externo, tem-se a indutância L_{ar} , vezes o comprimento l do tubo, dado por:tem-se a indutância dado por:

$$L_{ar} = \frac{\lambda_{ar} \cdot l}{I_0} = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{c}{b}\right) \quad (4.4)$$

sendo: $c = 37,00 \cdot 10^{-3}$ m; $b = 28,85 \cdot 10^{-3}$ m; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m; e o comprimento do tubo $l = 108,80 \cdot 10^{-3}$ m, a indutância no ar será:

$$L_{ar} = 5,414 \cdot 10^{-9} \quad \text{H} \quad (4.5)$$

- Para $c \leq r \leq d$, que pertence à região dentro do condutor tubular externo, tem-se a indutância L_{ext} , vezes o comprimento l do tubo, dado por:

$$L_{ext} = \frac{\lambda_{ext} \cdot l}{I_0} = \left(\frac{d^4 \cdot \mu \cdot \ln(c)}{2 \cdot \pi \cdot (c^2 - d^2)^2} + \frac{d^4 \cdot \mu \cdot \ln(d)}{2 \cdot \pi \cdot (c^2 - d^2)^2} + \frac{\mu \cdot (c^2 - 3 \cdot d^2)}{8 \cdot \pi \cdot (d^2 - c^2)} \right) \cdot l \quad (4.6)$$

sendo: $c = 37,00 \cdot 10^{-3}$ m; $d = 38,00 \cdot 10^{-3}$ m; $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m; e o comprimento do tubo $l = 108,80 \cdot 10^{-3}$ m, a indutância externa será;

$$L_{ext} = 1,960 \cdot 10^{-10} \quad \text{H} \quad (4.7)$$

Assim da equação 3.14, que soma as parcelas indutância tem-se:

$$L_0 = 1,692 \cdot 10^{-8} \quad \text{H} \quad (4.8)$$

4.2.3 Cálculo da Impedância em Frequências muito Altas

As Figuras 4.2 e 4.3, obtidas das equações 3.15 e 3.16, considerando a permeabilidade magnética μ de $300 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m, a condutividade elétrica σ de $1/7,8 \cdot 10^{-7} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, o raio externo do condutor tubular b de $28,85 \cdot 10^{-3}$ m e a espessura da parede do tubo ep de $0,15 \cdot 10^{-3}$ m, mostram o crescimento das parcelas resistiva e reativa da impedância em função do aumento da frequência. Para essas figuras variou-se a frequência de 10 Hz a 70 MHz.

A análise destas curvas mostra, entretanto, que há uma região aproximadamente linear a partir de 30 MHz, onde somente o fator R_S predomina. Portanto o valor de R_{AF} e ωL_{AF} pode, para frequências maiores que esse valor, ser calculado por:

$$R_{AF} = \omega L_{AF} = \frac{R_s}{2 \cdot \pi \cdot b} \cdot l \quad (4.9)$$

onde: l é o comprimento do tubo resistivo de $108,80 \cdot 10^{-3}$ m e R_s é dado pela equação 3.17.

Figura 4.2 – Gráfico resistência (R_{AF}) em função da frequência.

Figura 4.3 - Gráfico reatância indutiva (ωL_{AF}) em função frequência.

4.2.4 Cálculo da Capacidade Térmica do Elemento Resistivo

No cálculo da capacidade térmica, é importante ressaltar que foram considerados condições críticas de pico de corrente impulsiva e tempo máximo de utilização por impulso. Foram consideradas as equações 3.18, 3.19, 3.20 e 3.21 e alguns parâmetros, dependentes ou não, do material utilizados na construção do resistor, tais como:

- calor específico: $k = 0,5 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$;
- densidade do material: $\gamma = 8.900 \text{ kg/m}^3$;
- corrente máxima de aplicação: $I_0 = 100.000 \text{ A}$;
- tempo de aplicação de corrente impulsiva: $t_{apl} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ s}$;
- resistência DC: $R_0 = 3,12 \cdot 10^{-3} \Omega$;
- raio externo do tubo: $b = 28,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}$;
- raio interno do tubo $a = 28,70 \cdot 10^{-3} \text{ m}$; e
- comprimento do tubo $l = 108,80 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

cálculo do volume:

$$Vol = 9,39 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \quad (4.10)$$

a massa do tubo resistivo através da equação 3.21

$$m = 8,36 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \quad (4.11)$$

e com esses valores é possível calcular a variação de temperatura gerada pela passagem da corrente elétrica impulsiva, dada pela equação 3.19 em:

$$\Delta\theta \cong 224 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.12)$$

4.3 – Descrição Construtiva do Resistor Shunt

O *shunt* resistivo consiste em um tubo usinado em aço inox de 57,70 mm de diâmetro, 108,80 mm de comprimento com 0,15 mm de espessura de parede, ver a peça 1 da Figura 4.4. Duas tampas, peças 4 e 5, de alumínio de 3,60 mm de espessura, nas quais 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 Figura 4.4, como peça 11. Todo esse conjunto foi 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.

Figura 4.4 - Desenho expandido do resistor *shunt* coaxial desenvolvido

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); a tampa superior (peça 2), que possui um conector para entrada da corrente, é isolada do tubo externo (peça 8) por um anel de teflon(peça 10).

A tampa inferior (peça 3) que fecha o tubo externamente, possui, no centro, um furo para a passagem do conector tipo BNC (peça 11). O tubo externo (peça 8) possui uma flange, indicada como peça 9, de 125 mm de diâmetro e 5,0 mm de espessura, na qual será conectado o cabo de saída para a malha de aterramento.

Desta forma, seguindo a Figura. 4.4, a corrente a ser medida entra pela tampa superior 2, passa 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, 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 sobre o tubo resistivo de aço inox (peça 1), é medida através das tampas do próprio tubo (peças 4 e 5); estas tampas superior e inferior estão ligadas ao conector tipo BNC (peça 11), o qual, por exemplo, poderá estar conectado a um cabo coaxial ao osciloscópio de bancada.

Algumas fotos do R_{shunt} podem ser vistas nas Figuras 4.5.

Figura 4.5 – Resistor shunt desenvolvido: a) Tubo externo peça 8, com a flange de conexão da malha de aterramento peça 9; b) Tubo interno 1 de aço inox revestindo o tubo de sustentação de fenolite; c) Tampa de alumínio com o conector BNC peça 5; d) Montagem do resistor *shunt*; e) Detalhe do conector de entrada na tampa e o anel de teflon, peças 2 e 10 respectivamente; f) Resistor *shunt* montado.

Na Tabela 4.1 encontram-se descritos os materiais utilizados na construção do resistor *shunt* conforme peças numeradas e mostrados na Figuras 4.4

Tabela 4.1 - Descrição de peças e materiais utilizados na construção do resistor *shunt*.

	<i>NOME</i>	<i>MATERIAL</i>
Peça 1	tubo 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

Capítulo 5

Ensaios Realizados

Com o intuito de se determinar a resposta do resistor frente a correntes D.C. e impulsivas, foram realizados ensaios nos seguintes laboratórios:

- Laboratório de Medidas e Padrões na EESC-USP em São Carlos; e
- Instituto de Eletrotécnica e Energia IEE-USP em São Paulo.

Esses ensaios permitiram que se conhecesse o comportamento do Resistor *shunt* desenvolvido (R_{shunt}), bem como prover a calibração do mesmo por meio da determinação de seus parâmetros elétricos e comparação com resistor shunt padrão Haefely® ($R_{padrão}$).

5.1 Laboratório de Medidas e Padrões da EESC – USP

Ensaios iniciais realizados nesse laboratório possibilitaram medir a resistência elétrica do R_{shunt} em regime contínuo. Também foram executados ensaios para medição da impedância do resistor em altas frequências – de 50MHz até 70 MHz – utilizando-se um analisador de redes.

5.1.1 Materiais e Métodos

5.1.1.1 Medição da Resistência D.C.

Pelo método voltímetro-amperímetro, determinou-se a resistência D.C. do R_{shunt} , conforme diagrama esquemático mostrado na Figura 5.1.

A corrente elétrica foi medida em um amperímetro Digital – Yokogawa® 2531A e a tensão, medida com auxílio de um MultiMeter® HP 3458A. Foram também utilizados: uma bateria comum para autos de 60 ampères-hora e um resistor de fio de 1Ω e 200W de potência.

Figura 5.1 - Circuito de ensaio para medição de resistência elétrica do shunt

5.1.1.2 Resultados obtidos nos Ensaios D.C

Os valores de resistência elétrica, obtidos no ensaio acima descrito, estão dispostos na Tabela 5.1. Dos três ensaios, determinou-se o valor médio da resistência D.C., em $3,674m\Omega$.

Tabela 5.1 - Valores medidos da resistência elétrica pelo do método DC voltímetro-amperímetro.

	Valores Medidos (mΩ)
1º Ensaio	3,6781
2º Ensaio	3,6629
3º Ensaio	3,6811
Média = 3,674 mΩ - D. Padrão 0,00967	

5.1.1.3 Determinação da Impedância em Altas Frequências

Fase a dificuldade em se gerar altas correntes degrau para determinar o tempo de resposta do R_{Shunt} , desenvolveu-se uma metodologia para a medição de sua impedância em altas frequências, com um analisador de redes HP8720C (50MHz – 20GHz). Neste caso, duas etapas distintas são necessárias: a primeira, fazer uma calibração do equipamento; e a segunda etapa, que consiste nas medições propriamente ditas.

Para o processo de calibração, foi desenvolvido um dispositivo de acoplamento, capaz de conectar o resistor *shunt* ao cabo de medição do analisador de forma suave e sem descontinuidade ou mudanças bruscas quanto ao formato do condutor. Assim ajustou-se o diâmetro do R_{Shunt} , de 80,0 mm, à terminação desse cabo, que é equipada com conector tipo SMA de 3,5 mm, conforme mostra na Figura 5.2.

Figura 5.2 - R_{Shunt} conectado ao dispositivo de acoplamento do cabo do analisador de rede

O dispositivo de acoplamento foi construído de tal maneira que sua impedância característica é de $50\ \Omega$, isso mantendo-se a mesma proporção de seu diâmetro em qualquer sessão reta feita ao longo do dispositivo, com ilustrado na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Desenho esquemático em corte do dispositivo de acoplamento

Acoplado o dispositivo de acoplamento ao cabo do analisador de redes, o processo de calibração do conjunto possui três etapas distintas, ou:

- calibração em curto-circuito;
- calibração em aberto;
- calibração com carga de $50\ \Omega$.

As duas primeiras calibrações são relativamente fáceis de serem feitas pois basta curto-circuitar, ou não curto-circuitar, dispositivo de acoplamento. Entretanto para calibração com carga foi necessário desenvolver um anel de fechamento que fosse estritamente resistivo, com valor de $50\ \Omega$. Este anel, feito em placa para circuito impresso, continha resistores ligados em paralelo de forma e com valores convenientes, como mostrado esquematicamente na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Anel de $50\ \Omega$ para calibração com carga no analisador de rede

Esta calibração do equipamento, foi feita em uma faixa de frequência de 50MHz à 70MHz

O analisador de rede acoplado a uma placa GPIB-HP, em um microcomputador contendo o software *SoftPlot for Microwave Office*, versão 4.0, forneceu dados dos ensaios pela interface apresentada na Figura 5.5.

Figura 5.5 – Interface do Software de aquisição de dados do analisador de rede

Uma visão geral da bancada de ensaios é apresentada na Figura 5.6, onde são mostrados: o analisador de rede, dispositivo de acoplamento, R_{Shunt} e microcomputador de aquisição de dados.

Figura 5.6 – Vista geral da bancada de ensaios em altas frequências

5.1.1.4 Resultados Obtidos no Ensaio em Alta Frequência

Foram feitas dez medições na frequência de 55MHz, dentro da faixa de 50MHz à 70MHz, previamente calibrada no analisador. A frequência 55MHz, foi escolhida, por ser a que apresenta os menores erros nas medidas. Os resultados são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Valores medidos para impedância com analisador de rede na frequência de 55 MHz.

R (mΩ)	$\omega L(\Omega)$	L(nH)
332,82	1,40	4,03
345,64	1,37	3,96
315,50	1,37	3,97
330,14	1,37	3,96
351,85	1,37	3,97
341,43	1,36	3,94
342,96	1,36	3,94
346,56	1,35	3,91
341,61	1,36	3,92
Média = 338.72 mΩ D.Padrão = 10,97	Média = 1.37 Ω D.Padrão = 0,01	Média = 3,96 nH D.Padrão = 0,04

Esses dados são comparados com os valores teóricos – do item 4.2.3, calculados a partir da equação 4.9 – na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Comparação dos valores medidos e calculados para 55MHz

Valores Calculados		Valores Medidos (média)	
$R_{AF}(\Omega)$	$\omega L_{AF}(\Omega)$	$R_{AF}(\Omega)$	$\omega L_{AF}(\Omega)$
0,135	0,135	0,327	1,370

A comparação dos resultados das medições com os valores teóricos calculados para a impedância, feitos no item 4.2.3, mostram grande discrepância entre esses valores. A causa mais provável apontada para isso, foi que a medição realizada, descrita no item 5.1.1.3, obteve a impedância de todo o conjunto formado por: tubo interno resistivo; tubo externo de retorno; e resistências de contato nas duas tampas do R_{Shunt} . Como a fórmula para cálculo envolve a profundidade de penetração, que por sua vez é função da frequência, a resistência do tubo de externo

(de retorno da corrente) e das resistências de contato, se tornaram não desprezíveis, assumindo valores aproximadamente iguais à resistência do resistor shunt (tubo interno).

5.2 Laboratório do IEE – USP

Os ensaios realizados neste laboratório permitiram a determinação das características dinâmicas do R_{Shunt} , quanto à sua resposta temporal às solicitações impulsivas, e compará-lo ao $R_{Padrão}$ fabricado pela Haefely®. As excelentes respostas obtidas por ele, mostraram grande aplicabilidade do equipamento nas medições de correntes impulsivas na escala de corrente inicialmente proposta, – 2 kA a 100 kA.

5.2.1 Materiais e Métodos

O circuito de ensaio utilizado nos testes é semelhante ao circuito normalizado para tensão residual de pára-raios, mostrado na Figura 5.7. Basicamente consiste em um circuito RLC superamortecido, contendo: um transformador Haefely® de 380V/200kV com entrada primária controlada por reostato, um banco de capacitores de 2,25 μ F/ 200kV; um centelhador de esferas, uma indutância de 30 μ H; um $R_{Padrão}$ modelo *SHR100* com capacidade de medição até 100kA, com resistência elétrica de 2.632m Ω . Também complementam o circuito: dois blocos de óxido de zinco de 3kV modelo ASEA XAP, retirados de pára-raios de subestação de 10 kA, que evitam oscilações no impulso gerado pelo circuito de ensaio.

Figura 5.7 - Circuito de ensaio de impulso

O circuito de ensaio descrito acima gera uma forma de onda com valores de impulso próximos da forma de onda padrão 8/20μs. O que corresponde, respectivamente, a 8μs de tempo de frente e 20μs de tempo na cauda, em 50% do valor máximo da corrente, conforme ilustrado na Figura 5.8.

Figura 5.8 - Forma de onda padrão 8/20μs

Uma nova metodologia para medição de correntes impulsivas foi proposta para os ensaios do R_{Shunt} , tendo em vista uma futura aplicação do mesmo em medições de correntes impulsivas oriundas de descargas atmosféricas [8]. Essa

metodologia consistia em blindar todo o Sistema de Medição de Corrente (SMC) que compreende: osciloscópio, R_{Shunt} e cabos de medição, de modo a não haver qualquer interferência eletromagnética externa ao circuito no SMC. Essas interferências são comuns, principalmente no momento de disparo do circuito, quando ondas eletromagnéticas de alta frequência se propagam por todo o ambiente de ensaio.

As alterações consistiram em colocar o osciloscópio e seus acessórios em uma caixa metálica blindada, e para o R_{Shunt} construído, um invólucro metálico. A conexão entre a caixa e o invólucro, foi feita de um pequeno tubo de aço galvanizado, o qual acomodava convenientemente os cabos de medição. Essa montagem pode ser vista na Figura 5.9.

Figura 5.9 – a) Caixa metálica com osciloscópio e acessórios; b) Tubo de ligação aço galvanizado; c) Invólucro metálico contendo o R_{Shunt} .

Para efeito de comprovação de eficiência da blindagem proposta para o SMS, somente o R_{Shunt} fez parte desse sistema. Com isso foi possível comparar as formas de ondas geradas entre ele e o $R_{Padrão}$, uma vez que esse último não possuía qualquer blindagem especial.

A Figura 5.10 mostra o circuito de ensaios com a disposição dos osciloscópios de medição. A linha tracejada indica a blindagem na qual o SMC foi inserido.

Figura 5.10 – Circuito de ensaio para correntes impulsivas

Foram utilizados dois osciloscópios digitais Tektronik® modelo TDS3012. Esses osciloscópios possuem armazenamento digital e taxa de amostragem de 1,25GS/s (faixa de resposta de 100MHz), com tamanho máximo de registro de 10.000 pontos. Os dados armazenados na memória do equipamento podem ser gravados em discos de 3½" no *drive* do próprio equipamento, ou transferidos diretamente a um micro computador, através da conexão RS-232 existente.

Foram realizados seis ensaios com correntes impulsivas de valores de pico entre 3,5kA e 41,55kA. Cada evento registrado pelos osciloscópios continha cerca de 10.000 pontos, com valores de tensão (V) em função do tempo (μ s). Posteriormente os dados foram transferidos para um micro computador e convertidos em arquivos do aplicativo *Microsoft Excel*® no qual foi possível reconstruir a forma de onda gerada nos ensaios.

A Figura 5.11 demonstra um exemplo de formas de ondas obtidas a partir dos ensaios de corrente impulsivas de 3,5 kA. A curva desenhada em azul representa os

valores de tensão (V) em função do tempo (μs) obtidos para o $R_{\text{Padrão}}$. A curva desenhada em vermelho representa os valores de tensão (V) em função do tempo (μs) obtidos para o R_{Shunt} .

Figura 5.11 – Exemplo de formas de onda obtida a partir do ensaio de corrente impulsiva de 3,5 kA

Para obter o valor de resistência elétrica do R_{Shunt} , foi necessário dividir cada valor de tensão obtido pelo $R_{\text{Padrão}}$, por seu valor de resistência elétrica ($2.632\text{m}\Omega$), o que produziu um gráfico de corrente (kA) em função do tempo (μs). Posteriormente, ajustou-se a curva obtida do R_{Shunt} , de modo a sobrepor a forma de onda do $R_{\text{Padrão}}$. Isso tornou-se possível, dividindo-se cada valor de tensão obtido para o R_{Shunt} , por um valor de resistência conveniente, valor esse adotado com a resistência do mesmo. A Figura 5.12, como exemplo, mostra o ensaio de 3,5 kA com a sobreposição das formas de ondas.

Figura 5.12 – Exemplo de Sobreposição de formas de ondas para o ensaio com correntes impulsivas de 3,5 kA.

Para cada ensaio executado, foi possível comparar e ajustar duas vezes a forma de onda obtida para o R_{Shunt} , isto porque, em cada medição foram utilizados, simultaneamente, dois canais do osciloscópio do SMC no mesmo ponto de medição.

Foi calculada a média dos valores de resistência elétrica e esse valor foi considerado a resistência elétrica do equipamento desenvolvido. Assim, o R_{shunt} está calibrado, para medir qualquer outro valor de corrente impulsiva, até o máximo de sua capacidade térmica.

5.2.2 Resultados Obtidos nos Ensaios

Foram realizados seis ensaios com os seguintes valores de pico: 3,45kA, 12kA, 6kA, 20kA, 35kA, 41kA. Para cada um deles, são apresentados os gráficos de

O valor médio da resistência elétrica do R_{Shunt} está em 3,289 m Ω com desvio padrão de 0,0628. Esse valor pode ser considerado o valor de calibração do equipamento, considerando que não houve grandes variações entre os ensaios.

Valor de Pico da Corrente Impulsiva Aplicado no Ensaio	Resistor <i>Shunt</i> Desenvolvido R_{Shunt}				Resistor <i>Shunt</i> Haeфель® (como Referência) $R_{Padrão}$	
	Canal 1		Canal 2		Tensão Medida	Valor de Resistência Fornecida
	Tensão Medida	Valor de Resistência Calculada	Tensão Medida	Valor de Resistência Calculada		
3,50 kA	11,69 V	3,340 mΩ	11,66 V	3,330 mΩ	9,18 V	2,623 mΩ
6,00 kA	20,04 V	3,340 mΩ	19,92 V	3,320 mΩ	15,74 V	2,623 mΩ
11,70 kA	39,55 V	3,380 mΩ	38,96 V	3,330 mΩ	30,69 V	2,623 mΩ
20,60 kA	67,63 V	3,283 mΩ	67,63 V	3,283 mΩ	54,03 V	2,623 mΩ
37,74 kA	121,98 V	3,232 mΩ	119,75 V	3,173 mΩ	98,99 V	2,623 mΩ
41,55 kA	135,08 V	3,251 mΩ	133,08 V	3,203 mΩ	108,99 V	2,623 mΩ
Media 3,289 mΩ e desvio padrão 0,063 mΩ

Figura 5.13 – Valores de tensões medidas, sobre o $R_{\text{Padrão}}$ e R_{Shunt} , quando aplicado impulso de corrente de 3,45 kA (canal 1).

Figura 5.14 - Valores de tensões medidas, sobre o $R_{\text{Padrão}}$ e R_{Shunt} , quando aplicado impulso de corrente de 3,45 kA (canal 2).

Figura 5.15 – Sobreposição das formas de ondas de corrente de 3,45 kA. Valor de resistência elétrica: $R_{\text{Padrão}} = 2,623$; $R_{\text{Shunt}} = 3,340$ canal 1.

Figura 5.16 – Sobreposição das formas de ondas de corrente de 3,45 kA. Valor de resistência elétrica: $R_{Padr\tilde{a}o} = 2,623$; $R_{Shunt} = 3,330$ canal 2.

Figura 5.17 - Valores de tensões medidas, sobre o $R_{\text{Padrão}}$ e R_{Shunt} , quando aplicado impulso de corrente de 6,0 kA (canal 1).

Figura 5.18 - Valores de tensões medidas, sobre o $R_{\text{Padrão}}$ e R_{Shunt} , quando aplicado impulso de corrente de 6,0 kA (canal 2).

Figura 5.19 – Sobreposição das formas de ondas de corrente de 6,0 kA. Valor de resistência elétrica: $R_{\text{Padrão}} = 2,623$; $R_{\text{Shunt}} = 3,340$ canal 1.

Figura 5.20 – Sobreposição das formas de ondas de corrente de 3,45 kA. Valor de resistência elétrica: $R_{\text{Padrão}} = 2,623$; $R_{\text{Shunt}} = 3,320$ canal 2.

Figura 5.21 - Valores de tensões medidas, sobre o $R_{\text{Padrão}}$ e R_{Shunt} , quando aplicado impulso de corrente de 11,7 kA (canal 1).

Figura 5.22- Valores de tensões medidas, sobre o $R_{\text{Padrão}}$ e R_{Shunt} , quando aplicado impulso de corrente de 11,7 kA (canal 2).

Figura 5.23— Sobreposição das formas de ondas de corrente de 11,7 kA. Valor de resistência elétrica: $R_{\text{Padrão}} = 2,623$; $R_{\text{Shunt}} = 3,380$ canal 1.

Figura 5.24– Sobreposição das formas de ondas de corrente de 11,7 kA. Valor de resistência elétrica: $R_{\text{Padrão}} = 2,623$; $R_{\text{Shunt}} = 3,330$ canal 2.

Figura 5.25 Valores de tensões medidas, sobre o $R_{\text{Padrão}}$ e R_{Shunt} , quando aplicado impulso de corrente de 20,6 kA (canal 1).

Figura 5.26- Valores de tensões medidas, sobre o $R_{\text{Padrão}}$ e R_{Shunt} , quando aplicado impulso de corrente de 20,6 kA (canal 2).

Figura 5.27– Sobreposição das formas de ondas de corrente de 20,6 kA. Valor de resistência elétrica: $R_{\text{Padrão}} = 2,623$; $R_{\text{Shunt}} = 3,283$ canal 1.

Figura 5.28— Sobreposição das formas de ondas de corrente de 3,45 kA. Valor de resistência elétrica: $R_{\text{Padrão}} = 2,623$; $R_{\text{Shunt}} = 3,283$ canal 2.

Figura 5.29- Valores de tensões medidas, sobre o $R_{\text{Padrão}}$ e R_{Shunt} , quando aplicado impulso de corrente de 37,74 kA (canal 1).

Figura 5.30- Valores de tensões medidas, sobre o $R_{\text{Padrão}}$ e R_{Shunt} , quando aplicado impulso de corrente de 37,74 kA (canal 2).

Figura 5.31– Sobreposição das formas de ondas de corrente de 37,74 kA. Valor de resistência elétrica: $R_{\text{Padrão}} = 2,623$; $R_{\text{Shunt}} = 3,232$ canal 1.

Figura 5.32– Sobreposição das formas de ondas de corrente de 37,74 kA. Valor de resistência elétrica: $R_{\text{Padrão}} = 2,623$; $R_{\text{Shunt}} = 3,173$ canal 2.

Figura 5.33 Valores de tensões medidas, sobre o $R_{\text{Padrão}}$ e R_{Shunt} , quando aplicado impulso de corrente de 41,55 kA (canal 1).

Figura 5.34 Valores de tensões medidas, sobre o $R_{\text{Padrão}}$ e R_{Shunt} , quando aplicado impulso de corrente de 41,55 kA (canal 2).

Figura 5.35– Sobreposição das formas de ondas de corrente de 41,55 kA. Valor de resistência elétrica: $R_{\text{Padrão}} = 2,623$; $R_{\text{Shunt}} = 3,251$ (canal 1)

Figura 5.36– Sobreposição das formas de ondas de corrente de 41,55 kA. Valor de resistência elétrica: $R_{\text{Padrão}} = 2,623$; $R_{\text{Shunt}} = 3,203$ (canal 2)

Capítulo 6

Conclusões

A proposta inicial – Desenvolvimento de Resistor *Shunt* para medidas de Correntes Impulsivas – foi cumprida neste trabalho. As respostas às solicitações impulsivas são muito satisfatórias, quando comparadas com o Padrão Haefely®. Isso pode ser comprovado pelos gráficos no capítulo 5, os quais é possível notar grande fidelidade para com a forma de onda medida.

O Sistema de Medição de Corrente (SMC), que consistia em colocar o R_{Shunt} , osciloscópio de medição e demais cabos e acessórios em uma região provida de blindagem especial, funcionou satisfatoriamente, o que pode ser comprovado nos gráficos do capítulo anterior, onde se nota redução de ruídos na medição feita por esse sistema.

Problemas comuns pertinentes ao uso de resistores de baixo valor ôhmico, causadores de variação da resistência de contato, foram solucionados tornando R_{Shunt} um resistor de quatro terminais. Com essa modificação construtiva, os terminais usados para conexão de corrente ficam separados dos terminais de medição de tensão; ou seja, neste caso temos a medição de uma tensão que é proporcional à corrente que está sendo medida, quando em D.C., independente dos valores das resistências de contato no circuito.

O uso de material de alta temperatura de fusão, como aço inox, na construção do elemento resistivo, foi de fundamental importância, na garantia de suportabilidade de altas correntes impulsivas. Isso garante que o R_{Shunt} pode ser utilizado na faixa de corrente, proposta inicialmente nesse trabalho – 2 kA à 100kA – e também possibilitou a fabricação um elemento resistivo com espessura de parede extremamente reduzida, contribuindo, consideravelmente, na redução de efeitos eletromagnéticos indesejáveis, com o efeito pelicular.

Foi desenvolvida uma metodologia completa para medição da impedância do R_{Shunt} , com auxílio de um analisador de rede. Os excelentes valores de impedância medidos – média de 3,97 nH – mostram boa resposta em frequência, o que poder ser comprovado na comparação com $R_{Padrão}$, o qual possui tempo de resposta, fornecido pelo fabricante, menor que 70 ns.

Contudo, a comparação dos resultados das medições com os valores teóricos calculados para a impedância, feitos no item 4.2.3, mostram grande discrepância entre esses valores. A causa mais provável apontada para isso, foi que a medição realizada, descrita no item 5.1.1.3, obteve a impedância de todo o conjunto formado por: tubo interno resistivo; tubo externo de retorno; e resistências de contato nas duas tampas do R_{Shunt} . Como a fórmula para cálculo envolve a profundidade de penetração, que por sua vez é função da frequência, a resistência do tubo de externo (de retorno da corrente) e das resistências de contato, se tornaram não desprezíveis, assumindo valores aproximadamente iguais à resistência do resistor shunt (tubo interno).

Existe, portanto, duas alternativas deixadas como sugestão para trabalhos futuros: de se rever à teoria utilizada, buscando assim um modelo teórico mais coerente com os valores obtidos a partir dos ensaios realizados em altas frequências; ou de se mudar a forma de medição, buscando avaliar somente a impedância do tubo resistivo interno.

Em relação ao custo do resistor *shunt* desenvolvido, considerando materiais e mão de obra técnica, o custo é aproximadamente U\$ 50,00. Entretanto, esse valor estimado é irrisório quando comparado com gastos em horas de pesquisa cumulativas ao longo dos anos. Em nível de comparação podemos citar o valor do resistor *shunt* padrão, que custa em torno de U\$ 29.000,00. neste valor são considerados todos os custos de construção e pesquisa.

Finalmente, o resistor *shunt* desenvolvido apresentou excelentes respostas temporais e mostrou ser extremamente adequado para medidas de correntes impulsivas, tanto em laboratório, quanto em campo, em medições de correntes oriundas de descargas atmosféricas.

Referências Bibliográficas

- [1] PIANTINI, A. (1997). *Tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas em linhas aéreas, rurais e urbanas, considerando diferentes métodos de proteção - modelagens teórica e experimental e aplicação ao cálculo de interrupções*. São Paulo. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [2] FOUST, C. M.; KUEHNI, H. P. (1932). The Surge-crest Ammeter. *General Electric Review*, v. 35, n. 12, p. 644-648.
- [3] BERGER, K. et al. (1975). Parameters of Lightning Flashes. *Electra*, v.41, p. 23-37.
- [4] YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; MITANI, H.; TAKANISHI, A. (1983). Simultaneous measurement of lightning induced voltages with associated stroke currents. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 102, n. 8, p. 2420-27.
- [5] YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; MITANI, H.; YAMAZAKI, N. (1986). Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 1, n. 2, p. 129-39.

- [6] NAKAHORI, K.; EGAWA, T.; MITANI, H. (1982). Characteristics of winter lightning currents in Hokuriku district. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 101, n. 11, p. 4407-12.
- [7] GOTO, Y.; NARITA, K.; KOMURO, H.; HONNA, N. (1990). Current waveform measurement of winter lightning struck an isolated tower. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 20, ICLP: Proceedings. p. 19-21.
- [8] OHARA, T.; PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. (2001). 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/NT002/OR.
- [9] THOMAS, R. J. (1970). High-Impulse Current and Voltage Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation And Measurement*, v. IM-19, n. 2, p. 102 - 117.
- [10] RAMBOZ, J.D. (1996). Machinable Rogowski Coil, Design, and Calibration. *IEEE Transactions on Instrumentation And Measurement*, v. 45, n. 2, p. 511 -512.
- [11] KOJOVIC, L. (1997). Rogowski Coils Suit Relay Protection and Measurement. *IEEE Computer Applicatins in Power*, v. 10, n. 3, p. 47-52.

- [12] CRAG, J. H. (1954). High Voltage Laboratory Technique. *London Butterworths Scientific Publications*. Cap. 5, v. 39, p.153-166. 1954.
- [13] LAGO, B. et al. (1967). Coaxial shunt. *Proceedings The Institution of Electrical Engineers*, v. 114, p. 1317–1324.
- [14] SCHWAB, A. J. (1970). Low-resistance shunts for impulse currents. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 101, n. 11, p. 2251-2257.
- [15] MALEWSKI, R. (1977). Micro-Ohm Shunts for Precise Recording of Short-Circuit Currents. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 96, n. 2, p. 579 – 585.
- [16] MALEWSKI, R.; FESER, K.; CAVALLIUS, N. H. (1981). Elimination of The Skin Effect Error In Heavy-Current Shunts. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 100, n. 1, p. 1333 – 1340.
- [17] MALEWSKI, R. (1984). Wirewound shunt for measurement of fast current impulses. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 103, n. 10, p. 2927 - 2933.
- [18] NANDURI, V. (1977). Resistors for Recording Current in the Microsecond Region. *Review of Scientific Instruments*, v. 48, n. 11, p. 1485-1487.
- [19] OHARA, T.; SILVANETO, A.; PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. (2001). Levantamento bibliográfico – estudos envolvendo medições de correntes e de tensões induzidas por descargas atmosféricas. São Paulo, Instituto de

Eletrotécnica e Energia, Nota técnica DATNAS 001/NT001/OR, 21p., Abril 2001.

- [20] YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; SUZUKI, T.; KANAO, S. (1990). Winter Lightning on Japan Sea Coast - Development of Measuring System on Progressing Feature of Lightning Discharge. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 3, p. 1418-1425.
- [21] MICHISHITA, K.; ISHII, M.; KAMI, K. (2000). Induced voltage on a test distribution line associated with a lightning stroke to a tall structure. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 25, ICLP: Proceedings. p. 249-54.
- [22] ERIKSSON, A. J.; STRINGFELLOW, M. F.; MEAL, D. V. (1982) Lightning – induced overvoltages on overhead distribution lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v.101, n. 4, p. 960-8.
- [23] ERIKSSON, A. J.; MEAL, D. V. (1982) Lightning performance and overvoltage surge studies on a rural distribution line . *IEE Proceedings – C*, v. 129, n. 2, p. 59-69.
- [24] GELDENHUYS, H. J.; ERIKSSON, A. J.; BOURN, G. W. (1988). Fifteen years data of lightning current measurements on a 60 m mast. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 19, ICLP: Proceedings. p. 451-456.

- [25] TORRES, H.; HERRERA, F. (1994) Lightning research in Colombia. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 22, Budapest. ICLP: Proceedings. p. 1-7.
- [26] TORRES, H.; RUALES, L. K.; BARRETO, L.; HERRERA, F. (1996). Experience and first results of Colombian lightning location network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 23, Florence. ICLP: Proceedings. p. 45-49.
- [27] TORRES, H.; TRUJILLO, O.; AMÓRTEGUI, F.; HERRERA, F.; PINZÓN, G.; QUINTANA, C.; GONZÁLEZ, D.; RONDÓN, D. (1999). Experimental station to measure directly lightning parameters in tropical zone. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION AND POWER SYSTEMS, London, IEE, n. 467, v. 2, p. 112-119.
- [28] SCHROEDER, M. A. O.; SOARES, A. J; VISACRO, S. F.; CHERCHIGLIA, L. C. L.; SOUZA, V. J.; DINIZ, J. H.; CARVALHO, A. M. (1999). Evaluation of directly measured lightning parameters. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 5, São Paulo, SIPDA: Proceedings. São Paulo, p. 7-11.
- [29] TRIGINELLI, W.A.C., CARVALHO, A.M., DINIZ, J.H., CHERCHIGLIA, L.C.L. (1995). Principais parâmetros aplicáveis estudos de engenharia. *Eletricidade Moderna*, v. 1, p. 33.

- [30] DIENDORFER, G.; MAIR, M.; SCHULZ, W.; HADRIAN, W. (2000) Lightning current measurements in Austria – experimental setup and first results. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 25. ICLP: Proceedings. p. 44-47.
- [31] FUCHS, F.; LANDERS, E. U.; SCHMID, R. WIESINGER, J. (1998) Lightning current and magnetic field parameters caused by lightning strikes to tall structures relating to interference of electronic systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 40, n. 4, p. 444-51.
- [32] BARKER, P. P.; SHORT, T. A.; EYBERT-BERARD, A. R.; BERLANDIS, J. P. (1996). Induced voltage measurements on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p.980-995.
- [33] RAMO, S., WHINNERY, J.R., VAN DUZER, T. (1981). Conceitos de Circuitos e Elementos de Impedância. In: Campos e Ondas em Eletrônica das Comunicações. *Guanabara Koogan*. Cap. 4 e 5, p.187-190 e 217-232.
- [34] TORRES, H. et al. (1999). Design, construction and calibration of three devices to measure directly lightning parameters. *IEE Proceedings 10th ISH*, v. 2, n. 467.
- [35] Advanced Materials & Processes (2000). *Guide to Engineered Materials*. v.159, n.6, p.37

[36] HANDBOOK for eletrical engineers (2001). Cap 5, p. 481. McGraw-Hill.

[37] AK STEEL CORPORATION (2000). *Ak stell 309/309S stainless steel data sheet. /folder/*

A – APÊNDICE

O material utilizado para construção do elemento resistivo do “*shunt*”, citado anteriormente foi descrito na Tabela A.1. “Type 309 Stainless” de resistividade elétrica $\rho = 78 \mu\Omega \text{ cm}$, retirada da revista “Advanced Materials & Process”, Dezembro de 1999, pág. 37 [35].

Tabela A1 – Resistividade elétrica ρ do elemento resistivo do resistor *shunt* [35]

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

A condutividade elétrica é dada com uma porcentagem do padrão internacional do cobre temperado (IACS). A condutividade em %IACS é igual a 1724.1, dividido pela resistividade elétrica do material em nano-ohm-metro, [$n\Omega\text{m}$].

A resistividade elétrica é definida como a resistência elétrica do material multiplicado pela área da seção transversal do fio dividido pelo comprimento. O que equivale ao inverso da condutividade elétrica.

ADVANCED MATERIALS & PROCESSES/DECEMBER 2000

A tabela A.2 mostra a permeabilidade magnética relativa do aço utilizado $\mu_r = 300$. Retirada do livro “Handbook for Electrical Engineers”, chap. 5, página 481 [36].

Tabela A2– Permeabilidade magnética relativa [36].

Material	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

Desenhos Esquemáticos.

DESENHOS

Figura A1 – Resistor *shunt* desenvolvido montado.

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS–SEL–USP				
DESENHO ODAIR DA SILVA		ESCALA	SEM ESCALA	S.D.P.
		DATA	23/10/2001	
TÍTULO				FOLHA
Resistor (Shunt)				1/13

Figura A2 – Desenho expandido do resistor mostrando as várias peças de composição.

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS-SEL-USP			
DESENHO	ODAIR DA SILVA	ESCALA	SEM ESCALA
		DATA	23/10/2001
TÍTULO	Resistor (Shunt)		FOLHA
			2/13

Figura A3 – Detalhes do tubo resistivo de aço inox.

Peça 1

OBS:

• MATERIAL—AÇO—INOX E FENOLITE

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS—SEL—USP			
		ESCALA	SEM ESCALA
DESENHO	ODAIR DA SILVA	DATA	23/10/2001
TÍTULO	Resistor (Shunt)		FOLHA
			3/13

Figura A4 – Detalhes da tampa superior do tubo resistivo.

Peça 2

OBS:

• MATERIAL—ALUMÍNIO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS—SEL—USP			
		ESCALA	SEM ESCALA
DESENHO	ODAIR DA SILVA	DATA	23/10/2001
TÍTULO	Resistor (Shunt)		FOLHA
			4/13

S.D.P.

Figura A5 - Detalhes da tampa inferior do tubo resistivo.

Peça 3

OBS:

• MATERIAL—ALUMÍNIO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS—SEL—USP			
		ESCALA	SEM ESCALA
DESENHO	ODAIR DA SILVA	DATA	23/10/2001
TÍTULO	Resistor (Shunt)		FOLHA
			5/13

S.D.P.

Figura A6 - Detalhes da tampa superior interna do tubo resistivo.

Peça 4

OBS:

• MATERIAL—ALUMÍNIO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS—SEL—USP				
		ESCALA	SEM ESCALA	S.D.P.
DESENHO	ODAIR DA SILVA	DATA	23/10/2001	
TITULO				FOLHA
Resistor (Shunt)				6/13

Figura A7 - Detalhes da tampa inferior interna do tubo resistivo.

Peça 5

OBS:

• MATERIAL—ALUMÍNIO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS—SEL—USP			
		ESCALA	SEM ESCALA
DESENHO	ODAIR DA SILVA	DATA	23/10/2001
TÍTULO	Resistor (Shunt)		FOLHA
			7/13

S.D.P.

Figura A8 - Detalhes da bolacha isolante superior.

Peça 6

OBS:

• MATERIAL—PVC

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS—SEL—USP				
		ESCALA	SEM ESCALA	S.D.P.
DESENHO	ODAIR DA SILVA	DATA	23/10/2001	
TITULO			FOLHA	
Resistor (Shunt)			8/13	

Figura A9 - Detalhes da bolacha isolante inferior.

Peça 7

OBS:

• MATERIAL—PVC

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS—SEL—USP				
		ESCALA	SEM ESCALA	S.D.P.
DESENHO	ODAIR DA SILVA	DATA		
TÍTULO				FOLHA
Resistor (Shunt)				9/13

Figura A10 - Detalhe do tubo de retorno de corrente.

Peça 8

OBS:

• MATERIAL—ALUMINIO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS—SEL—USP			
		ESCALA	SEM ESCALA
DESENHO	ODAIR DA SILVA	DATA	23/10/2001
TÍTULO	Resistor (Shunt)		FOLHA
			10/13

S.D.P.

Figura A11 – Detalhe do anel de conexão de saída de corrente.

Peça 9

OBS:

• MATERIAL—ALUMINIO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS—SEL—USP			
		ESCALA	SEM ESCALA
DESENHO	ODAIR DA SILVA	DATA	23/10/2001
TÍTULO			FOLHA
Resistor (Shunt)			11/13
S.D.P.			

Figura A12 – Detalhe do anel isolante de teflon usado entre a tampa superior e o tubo externo.

Peça 10

OBS:

• MATERIAL—TEFLON

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS—SEL—USP				
		ESCALA	SEM ESCALA	S.D.P.
DESENHO	ODAIR DA SILVA	DATA	23/10/2001	
TÍTULO				FOLHA
Resistor (Shunt)				12/13

Figura A13 – Detalhe do conector BNC.

Peça 11

OBS:

MATERIAL—ALUMÍNIO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS—SEL—USP			
		ESCALA	SEM ESCALA
DESENHO	ODAIR DA SILVA	DATA	23/10/2001
TÍTULO	Resistor (Shunt)		FOLHA 13/13

S.D.P.

309/309S

STAINLESS STEEL

UNS S30900 AND UNS S30908

Types 309 and 309S are austenitic chromium-nickel stainless steels that provide excellent corrosion resistance and heat resistance plus good strength at room and elevated temperatures. Type 309S is identical to Type 309 except for a lower carbon content that minimizes carbide precipitation and improves weldability. They are essentially non-magnetic as annealed and become slightly magnetic when cold worked.

Typical uses include furnace parts, heating elements, aircraft and jet engine parts, heat exchangers, carburizing-annealing boxes, sulfite liquor handling equipment, kiln liners, boiler baffles, refinery and chemical processing equipment, and auto exhaust parts.

COMPOSITION

	Type 309 %	Type 309S %
Carbon	0.20 max.	0.08 max.
Manganese	2.00 max.	2.00 max.
Phosphorus	0.045 max.	0.045 max.
Sulfur	0.030 max.	0.03 max.
Silicon	0.75 max.	0.75 max.
Chromium	22.00 - 24.00	22.00 - 24.00
Nickel	12.00 - 15.00	12.00 - 15.00
Iron	Balance	Balance

AVAILABLE FORMS

AK Steel produces Types 309 and 309S Stainless Steels in thicknesses from 0.01" to 0.1874" (0.25 to 4.76 mm) and widths up to 48" (1219 mm). For other thicknesses and widths, inquire.

SPECIFICATIONS

Type 309	Type 309S
ASTM A 167	AMS 5523 ASTM A 240

PHYSICAL PROPERTIES

Density, 0.29 lbs/in³
9.01 g/cm³

Electrical Resistivity, microhm-in
(microhm-cm) 68°F (28.4°C) - 39.8 (78)

Thermal Conductivity, BTU/hr/ft²/ft/°F
(W/m•K)
212°F (100°C) - 9.0 (15.6)
932°F (500°C) - 10.8 (18.7)

Mean Coefficient of Thermal Expansion,
in/in/°F (μm/m•K)
32 - 212°F (0 - 100°C) 8.3 x 10⁻⁶ (14.9)
32 - 600°F (0 - 315°C) 9.3 x 10⁻⁶ (16.7)
32 - 1000°F (0 - 538°C) 9.6 x 10⁻⁶ (17.3)
32 - 1200°F (0 - 649°C) 10.0 x 10⁻⁶ (18.0)

Modulus of Elasticity, ksi (MPa)
29.0 x 10³ (200 x 10³)

Magnetic Permeability, (H = 200
Oersteds), Annealed 1.02 max.

Specific Heat, BTU/lb/°F (kJ/kg•K)
0.12 (0.50) 32 - 212°F (0 - 100°C)

Melting Range, °F (°C) - 2550 - 2650
(1399 - 1454)

MECHANICAL PROPERTIES

Table 1

Typical Mechanical Properties*

Condition	UTS ksi (MPa)	0.2% YS ksi (MPa)	Elongation % in 2" (50.8 mm)	Hardness Rockwell	Impact Strength Izod V-Notch ft-lbs (J)
Annealed	90 (621)	45 (310)	45	B85	110 (140)

*Room temperature.

Table 2

Elevated Temperature Properties

Test Temperature °F (°C)	UTS ksi (MPa)	0.2% YS ksi (MPa)	Elongation % in 2" (50.8 mm)
400 (204)	79.0 (545)	38.0 (262)	46
600 (316)	75.0 (517)	34.5 (238)	43
800 (427)	71.0 (490)	32.0 (221)	40
1000 (538)	64.0 (441)	29.0 (200)	38
1200 (649)	52.0 (359)	25.0 (172)	37
1400 (760)	35.0 (241)	21.5 (148)	39
1600 (871)	21.0 (145)	17.5 (120)	50
1800 (982)	10.5 (72)	—	—

CORROSION RESISTANCE

Types 309 and 309S provide excellent general corrosion resistance. They are more resistant to marine atmospheres than Type 304. They exhibit high resistance to sulfite liquors and are useful for handling nitric acid, nitric-sulfuric acid mixtures, and acetic, citric, and lactic acids.

These materials are generally considered heat-resisting alloys. Their destructive scaling temperature is about 2000°F (1093°C). They exhibit good scaling resistance in both continuous and intermittent service, but the alloys should not be used above 1800°F (982°C) for intermittent service.

FABRICATION

Types 309 and 309S Stainless Steels can be roll formed, stamped and drawn readily. In-process annealing is usually required to reduce hardness and increase ductility.

WELDABILITY

The austenitic class of stainless steels is generally considered to be weldable by the common fusion and resistance techniques. Special consideration is required to compensate for a higher coefficient of thermal expansion to avoid warping and distortion. Type 309 is generally considered to have weldability

nearly equivalent to the most common alloys of this class, Types 304 and 304L. When a weld filler is needed, AWS E/ER 309 and 310 are most often specified. Types 309 and 309S are well known in reference literature and more information can be obtained in this way.

HEAT TREATMENT

These alloys are not hardenable by heat treatment.

Annealing: Anneal at 1900 - 2050°F (1038 - 1121°C), then water quench or rapidly air cool.

METRIC CONVERSION

Data in this publication are presented in U.S. customary units. Approximate metric equivalents may be obtained by performing the following calculations:

Length (inches to millimeters) –

Multiply by 25.4

Strength (ksi to megapascals or meganewtons per square meter) –

Multiply by 6.8948

Temperature (Fahrenheit to Celsius) –
(°Fahrenheit - 32) - Multiply by 0.5556

Density (pounds per cubic inch to kilograms per cubic meter) –

Multiply by 27,670

The information and data in this product data sheet are accurate to the best of our knowledge and belief, but are intended for general information only. Applications suggested for the materials are described only to help readers make their own evaluations and decisions, and are neither guarantees nor to be construed as express or implied warranties of suitability for these or other applications.

Data referring to mechanical properties and chemical analyses are the result of tests performed on specimens obtained from specific locations with prescribed sampling procedures; any warranty thereof is limited to the values obtained at such locations and by such procedures. There is no warranty with respect to values of the materials at other locations.

AK Steel and the AK Steel logo are registered trademarks of AK Steel Corporation.

SPECIALTY AND STAINLESS STEEL FIELD SALES OFFICES**AK Steel Corporation**

703 Curtis Street

Middletown, OH 45043-0001

Customer Service 800-331-5050

Butler Works

P.O. Box 1609

Butler, PA 16003-1609

Customer Service 800-381-5663

Coshocton Works

17400 State Route 16

Coshocton, OH 43812

Customer Service 800-422-4422

AK Steel Sales Offices

Atlanta, GA-Southeast Region 770-514-0023

Baltimore, MD 410-612-1338

Charlotte, NC 704-662-0786

Chicago, IL-West Central Region 630-368-0001

Cincinnati, OH- Midwest Region 513-683-5300

Detroit, MI-North Central Region 248-641-7595

Grand Rapids, MI 616-949-5278

Nashville, TN-Southwest Region 615-771-3134

New England 401-658-3468

Pittsburgh, PA 412-635-9835

Tulsa, OK 918-298-2272

International Sales-Houston, TX ... 281-872-8741

Specialty Stainless and Electrical

Commercial-Butler, PA 800-381-5663