



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Mapa de Resistividades CELESC

Fernando H. Molina	Vilson Luiz Coelho	Adroaldo Raizer
CELESC	UFSC	UFSC
fernandohm@celesc.com.br	Wilson.coelho@gmail.com	adroaldo.raizer@gmail.com

Milvio R. de Lima		
CELESC		
milviorl@uol.com.br		

Palavras-chave

Aterramento
Proteção
Redes de Distribuição
Resistência de Aterramento
Resistividade

Resumo

Nos estudos do comportamento dos sistemas de distribuição frente às descargas atmosféricas, o conhecimento prévio das características dos aterramentos é fundamental, já que as soluções de proteção podem ser diferenciadas dependendo das características de cada aterramento. No entanto, o conhecimento destas características através dos métodos convencionais, geralmente é uma tarefa lenta e onerosa. Partindo-se desta conclusão optou-se por realizar um trabalho de pesquisa, no qual se correlaciona valores de resistividade do solo e/ou resistência de aterramento a tipos de solos constantes de um mapa de solos já existente. A metodologia adotada consistiu de medições em campo, estratificação do solo através de ferramenta computacional, cálculo da resistividade aparente e tratamento estatístico dos dados. Os resultados alcançados foram satisfatórios e permitiram a confecção de um mapa de resistividades para o Estado de Santa Catarina.

1 Introdução

O conhecimento amplo das características dos aterramentos em sistemas de distribuição é de fundamental importância para as concessionárias de energia elétrica. Aterramentos adequados contribuem para a segurança de equipamentos, operários e usuários assim como para o bom desempenho do sistema como um todo. Nos estudos do comportamento dos sistemas de distribuição frente às descargas atmosféricas, o conhecimento prévio das características dos aterramentos é fundamental já que as soluções de proteção podem ser diferenciadas dependendo das características de cada aterramento. Os pára-raios devem ser aterrados com o menor valor possível de resistência de aterramento, sendo que algumas normas sugerem valores nunca superiores a $80 \Omega^1$. Redes com cabos de cobertura somente apresentam resultados efetivos para aterramentos com baixos valores de

resistência de forma que as tensões induzidas nas fases não provoquem descarga disruptiva. Alguns autores sugerem o uso da equação 1:

$$\mathbf{Rat} < \mathbf{TDI/20} \quad (1)$$

O conhecimento do perfil de resistividade do solo no ponto de instalação de um aterramento permite o projeto e a execução de aterramentos eficientes e de baixo custo. No entanto, o conhecimento destas características geralmente é uma tarefa lenta e onerosa. Para um levantamento de resistividade do solo de um sistema de energia elétrica, publicações especializadas recomendam medições de 5 (cinco) pontos para cada 4 quilômetros quadrados de solo em regiões urbanas e um ponto a cada 500 m de rede para as regiões rurais. Considerando que a CELESC possui uma área de concessão de mais de 90.000 quilômetros quadrados e algo em torno de 63.000 quilômetros de redes de distribuição primárias, isto implicaria num número extremamente grande de medições inviabilizando prazos e orçamentos. Partindo-se desta conclusão optou-se por realizar um trabalho de pesquisa, no qual valores de resistividade do solo são correlacionados aos tipos de solos predominantes no Estado.

Nos capítulos que seguem está apresentado um estudo realizado com o objetivo de avaliar os níveis de aterramento das diversas regiões que compõem o Sistema de distribuição CELESC, baseado num mapa de solos existente². Este trabalho pode ser considerado como um estudo inicial passível de aprimoramentos em trabalhos futuros, conforme observado no capítulo Conclusões e Sugestões para Novos Estudos.

2 Metodologia

Com o auxílio do Mapa de Solos de Santa Catarina foram realizadas medições nos tipos de solos predominantes em diversas regiões. Com estas, testou-se vários métodos de estratificação do solo e através de um método híbrido, mais preciso para esta aplicação, calculou-se os diversos níveis de resistividade aparente para sistemas de aterramento com até 5 (cinco) hastes alinhadas. Finalmente, através de técnicas estatísticas chegou-se a um Mapa de Resistividades para o Estado de Santa Catarina.

3 Obtenção dos Dados

3.1 Mapa de Solos

O mapa de solos utilizado na etapa de medições de campo é o apresentado na figura 1, obtido do Atlas de Santa Catarina elaborado pelo Governo do Estado² em 1986.

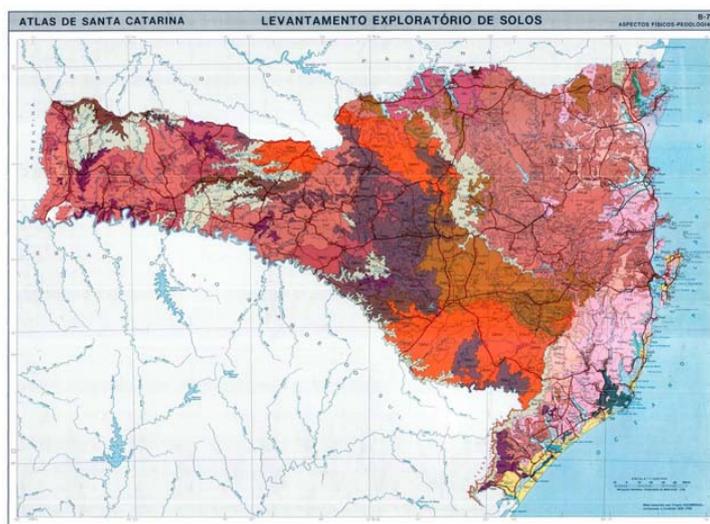


Figura 1

3.2 Medições em Campo

Foram realizadas 126 medições de resistividade do solo através do método de *Wenner* (quatro terminais), e Instrução Técnica CELESC³. Em 11 medições, além dos valores de resistividade foram medidos também valores de resistência de aterramento de uma haste e três hastes alinhadas, com o objetivo de aferir os métodos de estratificação do solo.

4 Estratificação do Solo

Os métodos de estratificação do solo são utilizados para, a partir das medições em campo, estimar-se os valores de resistividade aparente e resistência de aterramento, com o auxílio de equações algébricas, tabelas e ábacos. Logo no início deste trabalho percebeu-se uma grande diversidade entre os valores obtidos pelos diferentes métodos como também por diferentes procedimentos em um mesmo método. Isto levou ao desenvolvimento de um novo estudo objetivando a validação de um método mais confiável de estratificação do solo.

4.1 Avaliação dos Métodos de Estratificação do Solo

Dentre os diversos métodos de estratificação do solo existentes optou-se por utilizar aqueles cujos modelos matemáticos permitem transformá-lo num sistema computacional. Assim, foram analisados o método de *Duas Camadas*, que como o nome sugere transforma as medições de campo em um solo resultante composto de duas camadas e o método de *Pirson* que estratifica o solo em várias camadas⁴. Foram efetuadas medições de resistividade, resistência de uma haste e resistência de um conjunto de 3 (três) hastes alinhadas em diferentes tipos de solos. As hastes utilizadas nesta experiência foram de 2,4 metros, cravadas 2,3 metros em cavas circulares de 30 cm de profundidade. No caso das medições com 3 hastes, estas foram instaladas alinhadas com espaçamento de 3 metros e interligadas por condutores de cobre 25 mm².

A aplicação dos métodos de estratificação do solo selecionados nas medidas de campo resultou em elevadas taxas de erro entre os valores calculados e medidos. Além disso, percebeu-se um elevado número de soluções possíveis, com níveis de erro variando em função dos valores medidos, não permitindo desta forma a escolha por um dos métodos.

Considerando-se que o objetivo deste trabalho é analisar os aterramentos de sistemas de distribuição, cujas configurações e materiais são pré-definidos pelas próprias limitações do sistema, tais como, custo, dimensões limitadas, dificuldades de implantação, etc. optou-se por desenvolver um modelo híbrido de estratificação do solo, denominado *Pirson Modificado*. Este método consiste basicamente na utilização das medidas para espaçamento entre hastes até 4 metros para a definição da resistividade equivalente a uma única haste. A partir deste valor e utilizando-se das demais medições, para espaçamentos maiores, calcula-se a resistividade equivalente à camada mais profunda.

A tabela 1 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos pelos vários métodos quando comparados aos valores medidos. Observa-se que os valores calculados através da Planilha RSPM, onde se implementou o método modificado, apresentam valores de erros, máximo e mínimo, e coeficiente de variação (Cv), bastante inferiores aos demais métodos estudados.

Tabela 1

Erro (%)		Método		
		Duas Camadas	Pirson	PM
1H	Médio	24	34	18
	Máximo	94	94	44
	Cv	88	100	67
3H	Médio	46	56	39
	Máximo	126	126	101
	Cv	91	88	72

4.2 Cálculo da Resistividade Aparente

A partir dos valores de resistividade do solo, modelo de duas camadas pode-se calcular a resistividade aparente (ρ_a) para diversas configurações de aterramento. Para isto muitos autores⁴ recomendam o uso das curvas de *Endrenyi*. Nestas, a partir dos valores de resistividade das camadas (ρ_1 e ρ_2), da dimensão da primeira camada (d) e do raio do anel equivalente do sistema considerado (r) obtém-se um valor N que multiplicado por ρ_1 resulta no valor de ρ_a .

Com o objetivo de automatizar este procedimento, desenvolveu-se um modelo matemático através de polinômios de segunda e terceira ordem com resultados muito próximos aos constantes das curvas mencionadas, figuras 2 e 3.

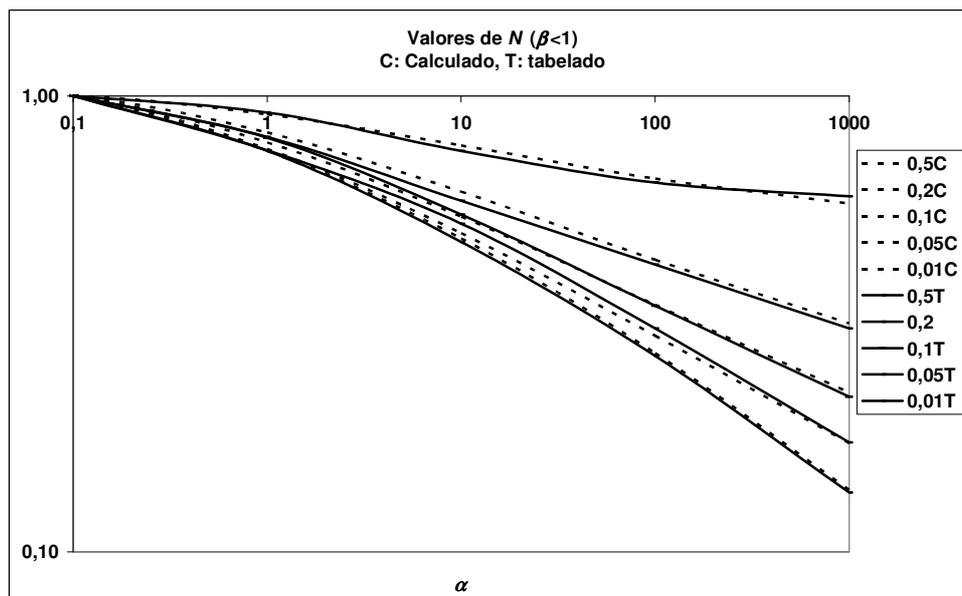


Figura 2

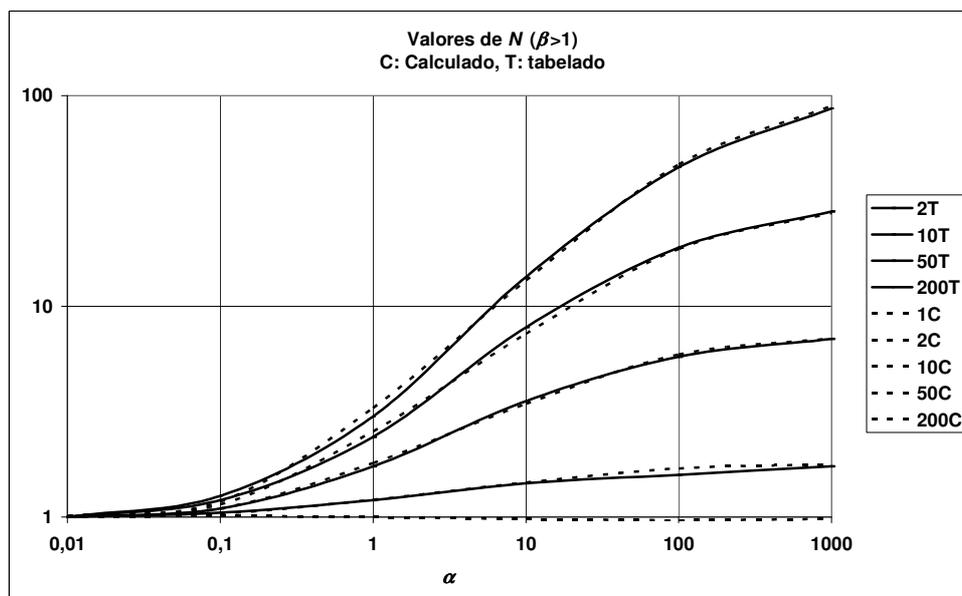


Figura 3

Para esta mesma aplicação, CHISHOLM⁵ sugere o uso da equação 2:

$$\rho_a = \rho_1 \frac{1 + C \frac{\rho_2 r}{\rho_1 d}}{1 + C \frac{r}{d}} \quad (2)$$

Onde:

$$p/ \rho_1 \geq \rho_2, C = \frac{1}{1,4 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{0,8}} \quad (3)$$

$$p/ \rho_1 < \rho_2, C = \frac{1}{1,4 + \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{0,8} + \left(\frac{\rho_2 r}{\rho_1 d}\right)^{0,5}} \quad (4)$$

4.3 Resultados

A tabela 2 mostra um resumo dos resultados após tratamento estatístico dos mesmos⁶. Nesta pode-se observar uma variação muito grande de valores, no entanto o coeficiente de variação (desvio padrão dividido pela média) médio das resistividades aparentes para 1, 3 e 5 hastes (1H, 3H e 5H) é de apenas 12%. Considerando os níveis de precisão dos processos até aqui utilizados, é possível utilizar um valor médio de resistividade aparente que possa representar todas as configurações.

Tabela 2

Valores (ohm x metro)	Resistividade Aparente (Ohmxm)			Média	cv (%)
	1H	3H	5H		
Máximo	16.752	17.892	20.778	16.938	54
Mínimo	4	4	5	4	1
Média	2.480	2.592	2.634	2.569	12
cv (%)	145	147	149	146	

4.4 Classes de Resistividades do Solo

Para um tratamento estatístico adequado é necessário que os resultados sejam classificados em faixas de resistividades. Como informado no parágrafo anterior, optou-se por utilizar um valor médio de resistividade aparente que aplicado na equação 5 resulta num valor estimado de resistência de aterramento. Considerando que para sistemas de aterramento com hastes alinhadas, o número máximo recomendado de hastes é cinco, utilizou-se este parâmetro para escolher os limites das classes utilizadas conforme tabela 3.

$$R_{nH} = K_R \left[\frac{\rho_a}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d} \right] [\Omega] \quad (5)$$

Onde:

R_{nH} = Resistência de aterramento para n hastes alinhadas;

L = comprimento da haste;

d = diâmetro da haste em metros;

K_R = coeficiente de redução para n hastes interligadas.

Tabela 3

Intervalos			
ρ_a (Ωm)	R5H (Ω)	f	p (%)
até 250	28,38	30	24,19
500	56,76	16	37,10
1.000	113,52	16	50,00
2.000	227,04	18	64,52
5.000	567,60	22	82,26
10.000	1135,20	14	93,55
acima 10.000	2270,40	8	100,00
Total		124	

O valor f representa a quantidade de valores que ocorrem em cada classe enquanto que p é o valor acumulado de f expresso em percentual do total.

Uma análise deste quadro permite concluir que mais de 64% das medidas apresentam valores de resistividade inferiores a 2.000 ohms x metro.

Das 126 medidas efetuadas, duas foram excluídas por apresentarem valores incoerentes.

4.5 Distribuição de Frequências

A tabela 4 apresenta as frequências com que os valores estratificados, dos diversos tipos de solo, ocorrem nas diversas faixas de resistividades pré-estabelecidas.

Tabela 4

Distribuição de Frequências											
Solos:	Classes							Σ	Máx	%	Classe
	1	2	3	4	5	6	7				
AQa	4	0	0	0	1	0	0	5	4	80	1
AQd	0	0	0	0	4	1	0	5	4	80	5
CBH	0	0	0	6	2	0	0	8	6	75	4
Ca	2	3	4	3	1	0	0	13	4	31	3
Cd	0	2	3	1	0	0	0	6	3	50	3
Ce	0	0	4	2	0	0	0	6	4	67	3
CHa	0	5	2	1	0	0	0	8	5	63	2
HGP	1	3	1	0	0	0	0	5	3	60	2
HOd	0	3	0	1	0	0	0	4	3	75	2
LBH	0	0	0	0	0	3	0	3	3	100	6
LBR	2	0	1	0	3	0	0	6	3	50	5
LEa	1	0	1	2	1	0	0	5	2	40	4
P	2	0	0	0	3	0	0	5	3	60	5
PVa	3	0	0	2	5	3	0	13	5	38	5
PVL	1	3	4	0	0	0	0	8	4	50	3
Re	0	1	3	2	0	0	0	6	3	50	3
SM	0	0	2	0	0	0	0	2	2	100	3
TBH	0	0	0	1	0	2	0	3	2	67	6
TBR	1	0	0	0	3	1	0	5	3	60	5
TRd	0	0	0	1	0	3	1	5	3	60	6
TRe	2	0	0	0	1	0	0	3	2	67	1
Totais/Médias	19	20	25	22	24	13	1	124	3	63	4

4.6 Resistividades dos Solos do Estado de Santa Catarina

Utilizando as classes com maior número de frequência para os diversos tipos de solo obtém-se as tabelas 5 e 6, que relacionam os tipos de solos a valores de resistividade, as quais, juntamente com o mapa de solos da figura 1, permitem a conclusão do Mapa de Resistividades do Estado, figura 4.

Tabela 5

Resistividade (ohm x metro)	Solos
até 250	AQa, TRe
250 a 500	CHa, HGPd, HOd,
500 a 1.000	Ca, Cd, Ce, PVLa, Re, SM
1.000 a 2.000	CBHa, LEa,
2.000 a 5.000	AQd, P, PVa, TBRa, LBRa
5.000 a 10.000	LBHa, TBHa, TRd

Tabela 6

Tipo	Descrição	Características	Resistividade (Ω x metro)
AQa	Areias Quartzosas álicas	Arenoso, dunas, plano	até 250
AQd	Areias Quartzosas distróficas	Arenoso, dunas, plano	2.000 a 5.000
Ca	Cambissolo álico	Argiloso, Ondulado e Fort. Ondulado	500 a 1.000
CBHa	Cambissolo Bruno Húmico álico	Argiloso, pedregoso, rochoso, Ond. e Fort. Ondulado	1.000 a 2.000
Cd	Cambissolo distrófico	Argiloso, Plano e Suave Ondulado	500 a 1.000
Ce	Cambissolo eutrófico	M. Argiloso, Ondulado e Forte Ondulado	500 a 1.000
CHa	Cambissolo Húmico álico	Argiloso, Ondulado e Fort. Ondulado	250 a 500
HGHe	Glei Húmico eutrófico	Argiloso, plano e areias quartzosas	
HGPd	Glei Pouco Húmico distrófico	Argiloso, plano	250 a 500
HOd	Solos Orgânicos distróficos	Argiloso, plano	250 a 500
LBHa	Latossolo Bruno Húmico álico	Argiloso, Ondulado Suave	5.000 a 10.000
LBRa	Latossolo Bruno intermediário p/ Latossolo Roxo álico	Muito Argiloso, Ondulado Suave	2.000 a 5.000
LEa	Latossolo Vermelho-Escuro álico	Argiloso e Muito Argiloso, Ondulado	1.000 a 2.000
P	Podzólico Indiscriminado	Arenoso	2.000 a 5.000
PVa	Podzólico Vermelho-Amarelo álico	Argiloso, Cascalhoso, Ondulado	2.000 a 5.000
PVd	Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico	Argiloso, Ondulado	
PVLa	Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico álico	M. Argiloso, Argiloso, Fortemente Ondulado	500 a 1.000
Ra	Solos Litólicos álicos	Argiloso, granito, montanhoso	
Re	Solos Litólicos eutróficos	Argiloso, granito, montanhoso	500 a 1.000
SM	Solos Indiscriminados e Mangue	Mangue	500 a 1.000
TBHa	Terra Bruna Estruturada Húmica álica	M. Argiloso, Argiloso e Pedregoso, Ondulado	5.000 a 10.000
TBRa	Terra Bruna Estruturada intermediária	M. Argiloso, Argiloso e Pedregoso, Fortemente Ondulado	2.000 a 5.000
TBRd	Terra Bruna Estruturada intermediária para Terra Roxa	M. Argiloso, Argiloso e Pedregoso, Fortemente Ondulado	
TRd	Terra Roxa Estruturada distrófica	M. Argiloso, Argiloso e Pedregoso, Fortemente Ondulado	5.000 a 10.000
TRe	Terra Roxa Estruturada eutrófica	M. Argiloso, Argiloso e Pedregoso, Fortemente Ondulado	até 250
TVBa	Terra Vermelha-Brunada Estruturada álica	Argiloso, Ondulado Suave	

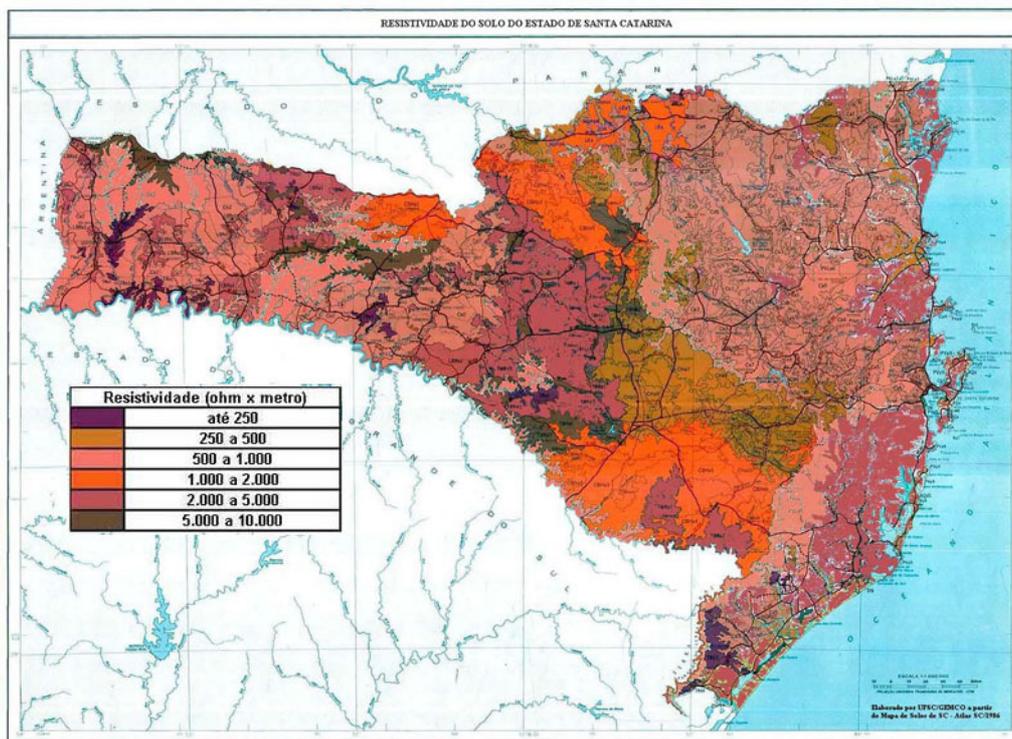


Figura 4

5 Conclusões e Sugestões para Novos Estudos

5.1 Metodologia

Os resultados aqui apresentados indicam a viabilidade e a facilidade de se obter um mapa de resistividades a partir de um mapa de solos. Mesmo com um baixo nível de precisão, é grande a utilidade deste mapa na elaboração de projetos de redes, no entanto, este estudo deve ser considerado como inicial, devendo ser aprimorado, conforme sugestões a seguir.

5.2 Confiabilidade dos Resultados

Através dos valores apresentados na tabela 4, pode-se perceber valores baixos de probabilidade de ocorrência em alguns tipos de solos. Por este motivo sugere-se a utilização deste mapa de resistividades como indicador macro em estudos de planejamento, orçamento etc. Para a elaboração de projetos de instalação de equipamentos, medidas localizadas devem ser efetuadas.

5.3 Fatores de Erros

São muitos os fatores que contribuem para a ocorrência de erros neste tipo de estudo sendo que alguns dos quais estão a seguir destacados:

5.3.1 Confiabilidade dos dados contidos no mapa de solos

Ao final deste trabalho, tomou-se conhecimento da publicação de um mapa revisado de solos do Estado de Santa Catarina. A EMBRAPA⁷ possui mapas atuais de solos. Nestes é possível obter informações mais detalhadas e precisas dos solos e sua localização. Sua utilização aliada às sugestões aqui apresentadas poderá melhorar significativamente os resultados desta pesquisa.

5.3.2 Quantidade de Medidas

O número de medições deve ser aumentado de forma a garantir maior precisão nos resultados.

5.3.3 Fator Umidade

O fator umidade interfere significativamente no resultado final, por isso um critério mais rigoroso deve ser adotado ao se classificar as condições em que o solo foi medido e regras de adequação destas medições a uma mesma referência.

5.3.4 Métodos de Estratificação

Os métodos de estratificação do solo também incorrem em erros, e novos estudos devem ser feitos no sentido de aprimorá-los para as condições do trabalho em questão.

6 Bibliografia

- 1 RAIZER, A. et al; Projeto CELESC 0395-018-2003, Relatório I, Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico - ANEEL. Florianópolis, 2004.
- 2 GOVERNO DO ESTADO DE SANTA CATARINA ; Atlas de Santa Catarina, Gabinete de Planejamento – GAPLAN, Aerofoto Cruzeiro, Rio de Janeiro, 1986.
- 3 CELESC S/A; I-313.0008 Medição de Resistividade do Solo, DVNE, Florianópolis, 1985.
- 4 KINDERMANN, G. e CAMPAGNOLO, J.M., Aterramento Elétrico, Sagra, Porto Alegre, 1991.
- 5 CHISHOLM, W. A., Recent Progress in Design and Test Methods for Transmission Line Ground Electrodes In: VII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION. Proceedings. Curitiba, Brazil, 2003, IEE/USP. P.591-603.
- 6 COSTA NETO, P.L.O., Estatística, Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1992.
- 7 EMBRAPA; Mapa de Solos do Estado de Santa Catarina (1:250.000) http://mapserver.cnps.embrapa.br/website/pub/Santa_Catarina/viewer.htm. Acesso em 28/02/2005.