



**XXIII SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GLT/02  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – III**

**GRUPO DE ESTUDO LINHAS DE TRANSMISSÃO- GLT**

**REVESTIMENTOS CONDUTIVOS DOPADOS COM NANOPARTÍCULAS PARA REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Vieira, F.Y.M.(\*)**  
IPT

**Joaquim, L.E.**  
IPT

**Almeida, N.L.A.**  
IPT

**Junior, E.L.C.**  
EATE

**Almeida, M.B.**  
IPT

**Panosian, Z.**  
IPT

**RESUMO<sup>1</sup>**

O objetivo deste projeto foi reduzir a resistência de aterramento de torres de linha de transmissão em solos arenosos de altíssima resistividade elétrica, utilizando recobrimentos de microconcreto condutivo contendo nanopartículas hidrofílicas. É uma solução ao aterramento de torres em regiões de estiagem sazonal, onde a eficácia de produtos existentes é insatisfatória. Os resultados obtidos em protótipos mostraram que cabos de aterramento de aço zincado recobertos com microconcreto contendo nanopartículas hidrofílicas de  $\text{TiO}_2$  ou de  $\text{SiO}_2$  são eficazes para reduzir a resistência de aterramento em quase 90 % quando comparado a protótipos semelhantes sem recobrimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aterramento, concreto condutivo, nanotecnologia, nanopartícula hidrofílica, resistência de aterramento

**1.0 INTRODUÇÃO**

Concessionárias de energia elétrica com linhas de transmissão (LT's) que atravessam regiões arenosas e de alta incidência de descargas atmosféricas apresentam problemas de interrupção de energia devido à formação de arco elétrico entre a estrutura metálica da torre, penca de isoladores e cabos elétricos, provocando um curto-circuito fase-terra (*back flashover*) [1, 2]. Nas regiões com altos índices isoceraúnicos, há uma grande probabilidade dessa ocorrência na fase inicial de períodos de chuva, quando o solo arenoso ainda se encontra muito seco e, consequentemente, altamente resistivo e a resistência do pé da torre está fora dos limites aceitáveis [3]. Isso dificilmente ocorre em regiões com solos argilosos, pois estes conseguem reter a umidade do solo, garantindo um valor baixo de resistência aterramento do pé da torre, mesmo em períodos de estiagem. Interrupções não programadas geram muitas por indisponibilidade do sistema [4] e transtorno aos usuários, sendo um dos métodos utilizados para evitar a interrupção o uso de para-raios ao longo da LT [5]. Outro método utilizado em sistemas de aterramento em solos de alta resistividade é a adoção de eletrodos recobertos com concreto [6, 7] ou então envoltos em géis ou bentonita [8].

Com base em pesquisa bibliográfica [9-20], verificou-se que o uso de nanopartículas como aditivos para os recobrimentos de concreto, objetivando a redução da sua resistividade, poderia ser uma alternativa viável, pois estas podem ser modificadas para lhes conferir propriedades desejadas. Assim sendo, resolveu-se pesquisar no mercado nanopartículas hidrofílicas para adicionar ao concreto, objetivando diminuir a resistividade.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver recobrimentos contendo nanopartículas para aplicação em cabos de aterramento de torres de LT para reduzir o valor da resistência de aterramento do pé de torre em frequência industrial. Embora o cálculo da impedância de surto para uma determinada configuração de torre de transmissão

<sup>1</sup> Este artigo foi submetido ao VIII CITENEL a ocorrer de 17 a 19 de Agosto de 2015.

depende de outros parâmetros envolvendo o formato geométrico da torre, intensidade da corrente das descargas atmosféricas e outros [21], em trabalhos cujo objetivo é proporcionar uma redução da probabilidade de ocorrência de *back flashover* em torres de transmissão é prática usual efetuar a redução do valor da resistência de aterramento medida em frequência industrial [22].

Foram selecionadas nanopartículas [23, 24] que, quando adicionadas ao recobrimento base, eram capazes de reduzir a resistência de aterramento. Tanto a seleção do recobrimento base como a seleção das nanopartículas foi feita por meio de experimentos de laboratório. Os recobrimentos com melhores resultados foram utilizados em experimentos de campo. Os resultados obtidos ao longo do período do projeto mostraram que microconcretas com duas formulações desenvolvidas à base de nanopartículas hidrofílicas de  $\text{TiO}_2$  e de  $\text{SiO}_2$ , quando aplicados como recobrimento de cabos de aterramento, são eficazes para reduzir a resistência de aterramento. No solo estudado, reduziu-se a resistência de aterramento em quase 90 % em relação a um cabo de aterramento sem recobrimento (denominado testemunho) e de mesmo comprimento e em cerca de 60 % em relação a um produto comercial.

## 2.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados no desenvolvimento do microconcreto foram: areia com granulometria entre 0,15 mm e 2,4 mm; cimento Portland CP-IV; pedrisco com granulometria de 6,3 mm a 9,5 mm; grafite com granulometria entre 5  $\mu\text{m}$  a 65  $\mu\text{m}$  e densidade aparente entre 0,10 g/mm<sup>3</sup> e 0,15 g/mm<sup>3</sup>; aditivo superplastificante ASTM C494 Tipo F e cabo de aterramento de aço-carbono zincado de  $(9,52 \times 10^{-3})$  m (3/8"), uma cordoalha de sete fios, fabricada conforme as normas ASTM A 475/95 e NBR 5909/85.

Foram estudadas as seguintes nanopartículas: três amostras de nanopartículas de sílica comerciais para aplicação em concreto (**SiO<sub>2</sub>-C1**, **SiO<sub>2</sub>-C2** e **SiO<sub>2</sub>-C3**); uma amostra de nanopartículas de sílica com propriedades hidrofílicas produzida pela equipe do projeto (**SiO<sub>2</sub>-H1**); uma amostra de nanopartículas de sílica com propriedades hidrofílicas produzida industrialmente sob encomenda (**SiO<sub>2</sub>-H2**); uma amostra de nanopartículas de dióxido de titânio (**TiO<sub>2</sub>**) comercial, tamanho de 20 nm, revestido com silicone; uma amostra de nanopartículas de dióxido de titânio (**TiO<sub>2</sub>-AI**) comercial, tamanho de 20 nm, revestido com silicone e alumínio. Como referência, foi adquirido um produto comercial (**PC1**) disponível no mercado internacional à base de cimento Portland e grafite, utilizado como recobrimento de cabos de aterramento.

Para a caracterização físico-química dos solos, foram coletadas amostras de solo a cerca de meio metro de profundidade, nas proximidades da Torre 111, da Torre 174 e da Torre 214 da LT 230 kV. As amostras foram acondicionadas em frascos de vidro vedados, lacrados e protegidos da luz até a abertura para as análises.

A coleta de dados de temperatura e umidade relativa do ar, nas quatro estações do ano, em pontos diferentes ao longo da linha de transmissão de 230 kV foi feita utilizando termo-higrômetros registradores, colocados em abrigos feitos em madeira com aberturas para ventilação e fixados junto às treliças inferiores das torres.

Para realizar medidas de aterramento foi utilizado o método da queda de potencial (ou método de três pinos) seguindo a Norma IEEE std 81-2012 e as recomendações do manual do usuário do terrômetro digital utilizado nas medições da marca AEMC *Instruments* modelo 6472 *Ground Flex Kit*. As medidas de resistividade do solo foram realizadas pelo método de Wenner, conforme normas IEEE Std 81-2012 e NBR 7117:2012, utilizando um terrômetro digital, marca AEMC *Instruments*, modelo 6472 *Ground Flex Kit*.

Para a preparação da massa do microconcreto, primeiramente, misturaram-se todos os componentes sólidos e, em seguida acrescentou-se uma mistura dos componentes líquidos. Após a homogeneização, os corpos de prova foram moldados e curados nos moldes envoltos em filme plástico (para evitar a evaporação superficial e consequente contração do material). Os corpos de prova para experimentos em câmara climática foram moldados com dimensões de 0,20 m x 0,06 m x 0,06 m. Esses foram expostos em câmara climática mantida a 28 °C e 20 % de umidade relativa, sendo a resistividade determinada em quatriplicata pelo método de Wenner, antes e após a exposição, utilizando um medidor da marca Proceq modelo Canin+. Os corpos de prova para os experimentos em caixas de modelo reduzido de aterramento foram moldados com dimensões de 0,16 m x 0,10 m x 0,04 m. Esse, com um arame zincado do cabo de aterramento ( $\phi=0,003$  m, 0,2 m de comprimento) no centro, deixando uma ponta de acesso para permitir conexão elétrica. O modelo reduzido consistiu em uma caixa de material isolante (madeira) de dimensões 1,0 m x 0,84 m x 0,50 m para acomodar uma quantidade de solo homogêneo, no caso, areia, onde foi instalado um eletrodo de aterramento. O modelo reduzido foi feito visando aproximar as condições encontradas em campo

Para fins de comparação, foram montados modelos reduzidos com um pedaço de fio simulando um cabo de aterramento sem recobrimento e outro com bloco de cobre nas mesmas dimensões do eletrodo de aterramento (0,10 m x 0,06 m x 0,04 m). O bloco de cobre nas mesmas dimensões do corpo de prova de microconcreto visou simular um eletrodo de aterramento com baixa resistividade elétrica. A umidade do solo nas caixas foi medida com o auxílio de um sensor de umidade, marca Falker, modelo HFM1010.

Os protótipos foram instalados em campo, na região de interesse da LT 230 kV SE Brasnorte/Parecis. Para

instalação dos eletrodos, foram feitas valas de aproximadamente 5,5 m de comprimento, 0,6 m de largura e 1,0 m de profundidade. O fundo da vala foi nivelado e aí foi colocado um molde de madeira. A mistura para recobrimento do cabo de aterramento foi realizada utilizando-se uma betoneira. Após homogeneização, a mistura foi depositada no molde de madeira até o nível aproximado de 0,05 m. A seguir, sobre a camada depositada, colocou-se o cabo de aterramento (5,5 m) e continuou-se a deposição da mistura até atingir uma altura aproximada de 0,10 m. Os moldes utilizados tinham dimensões de 4 m x 0,40 m x 0,10 m.

Após aproximadamente 15 h de cura, retirou-se o molde e o solo removido durante a escavação foi depositado sobre o protótipo, deixando-se uma ponta do cabo de aterramento para acesso e realização de medições da resistência de aterramento. Essas medições foram realizadas pelo método da queda de potencial.

### 3.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados dos experimentos e análises realizados para a caracterização dos solos coletados em campo. Pode-se verificar que o solo da Torre 111 é classificado como argila arenosa, com predominância de caulinita, o solo da Torre 214 é arenoso, composto de areia média a fina e o solo da Torre 174 também é arenoso, composto essencialmente de areia fina. O solo da Torre 111 é muito mais condutivo e contém muito mais umidade que os solos das torres 174 e 214.

Tabela 1 – Caracterização dos solos coletados ao longo da LT Brasnorte/Parecis

Torre Próxima	111	174	214
Areia fina / média / grossa (%)	12,0 / 11,5 / 0,5	51,5 / 43,5 / 0	38,0 / 55,0 / 1,0
Argila / silte (%)	64,0 / 12,0	4 / 1	3,0 / 3,0
Classificação do solo	Argila arenosa	Areia fina	Areia média a fina
Teor de matéria orgânica (%)	11,67	1,64	1,09
Teor de umidade gravimétrica (%)	24,4	7,5	8,1
pH em água	5,53	4,82	6,29
Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	33,63	15,89	19,16
Argilomineral predominante provável	Caulinita	Raros argilominerais. Provável caulinita	Predominantemente arenoso

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar, coletados em campo, foram agrupados por estação do ano e intervalos de horas. Os resultados da Torre 111 (T-111) e Torre 214 (T-214) são mostrados na Figura 1. É possível visualizar as quedas bruscas de umidade relativa durante o dia devido ao aumento brusco da temperatura, efeito acentuado na região onde fica a Torre 214. No outono, a umidade relativa do ar não cai muito, mesmo com temperaturas elevadas. No inverno, as temperaturas sobem bastante e a umidade relativa do ar reduz a níveis muito baixos, sendo este efeito mais acentuado próximo à Torre 214. Na primavera e no verão, o comportamento nos dois locais de coleta de dados é semelhante, mas no verão a umidade do ar fica sempre elevada, assim como a temperatura. As condições climáticas, somadas ao tipo de solo encontrado, que durante os meses de inverno é mais seco, fazem com que a região junto à Torre 214 seja mais propícia a altos valores de resistência de aterramento de pé de torre, já que a retenção de água é precária em um solo arenoso.

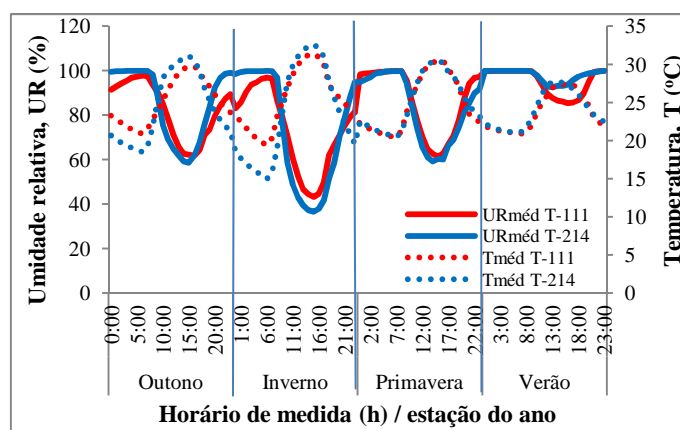


Figura 1 – Variação de temperatura e umidade relativa do ar da Torre 111 e da Torre 214 conforme o período do dia e por estação do ano.

A Tabela 2 apresenta alguns experimentos iniciais em câmara climática, utilizando o produto comercial apenas com adição de água (PC1), e outros com nanopartículas de silício comerciais para aplicação em concreto (PC1+ SiO<sub>2</sub>-C1, PC1+SiO<sub>2</sub>-C2 e PC1+SiO<sub>2</sub>-C3). Pode-se verificar que a adição das nanopartículas no produto comercial determinou uma diminuição da resistividade inicial

Tabela 2 - Medidas de resistividade de corpos de prova do produto comercial sem e com adição de nanopartículas SiO<sub>2</sub>-C3, SiO<sub>2</sub>-C1 e SiO<sub>2</sub>-C2, após exposição em câmara climática mantida a 28 °C e 20 % de umidade relativa.

Descrição sucinta	Resistividade (Ω·m)			
	1 dia	8 dias	15 dias	25 dias
PC1	99	89	23	10
PC1 + 1 % SiO <sub>2</sub> -C3	36	37	54	370
PC1 + 1 % SiO <sub>2</sub> -C1	38	50	54	28
PC1 + 5 % SiO <sub>2</sub> -C1	19	11	28	12
PC1 + 10 % SiO <sub>2</sub> -C1	37	5	10	26
PC1 + 1 % SiO <sub>2</sub> -C2	39	58	3	36

Para confirmar os resultados obtidos em câmara climática, foram realizados experimentos em caixas de modelo de aterramento com o recobrimento comercial, assinalados com a cor cinza na Tabela 2 (ver Tabela 3). Conforme já mencionado, para comparação também foram realizados experimentos com um testemunho (fio sem recobrimento) e um bloco de cobre de dimensões similares ao do fio zincado com recobrimento. O produto comercial **PC1** foi preparado conforme orientações do fabricante, que recomenda colocar o produto seco envolvendo o fio condutor. Pela Tabela 3, pode-se verificar que o valor da resistência do cabo testemunho assumiu valores acima de 10 kΩ. O bloco de cobre assumiu valores inferiores a 10 kΩ após dois dias de experimento, com uma exceção. Considerando que o cobre apresenta uma boa condutividade, valores abaixo de 10 kΩ podem ser considerados aceitáveis para uma resistência de aterramento nas condições dos experimentos.

O **PC1** apresentou valores inferiores a 10 kΩ após dois dias, mantendo-se assim até o final do experimento. Esse mesmo recobrimento com adição de nanopartículas de silício (**PC1+5 % SiO<sub>2</sub>-C1**) também apresentou valores inferiores a 10 kΩ após dois dias e assim se manteve vários dias. No entanto, no final do experimento, piorou assumindo valores muito superiores a 10 kΩ. Este comportamento pode ter sido um erro experimental, já que se constatou que a exposição a céu aberto das caixas de madeira cobertas com lonas plásticas para proteção contra a chuva não garantia uniformidade da umidade do solo ao redor do eletrodo: medidas feitas com uma sonda de umidade acusaram valores diferentes para caixas diferentes. Esta diferença de umidade do solo nas caixas deve ter sido a causa do aumento não esperado da resistência de aterramento medido. Assim sendo, resolveu-se ensaiar em campo o recobrimento comercial tanto sem (**PC1**) como com nanopartículas (**PC1+5 % SiO<sub>2</sub>-C1**).

Tabela 3 – Resultados dos experimentos em caixas de modelo de aterramento - produtos comerciais sem e com adição de 5 % de nanopartículas SiO<sub>2</sub>-C1.

Descrição sucinta	Resistência de aterramento (kΩ)						
	Data						
	23 set.	25 set.	27 set.	3 out.	7 out.	18 out.	24 out.
Testemunho	-	-	-	20	13	18	17
Cobre	67	8,6	5,3	5,9	5,5	8,8	5,7
PC1	41	9,1	6,3	4,4	4,0	4,0	3,5
PC1+5 % SiO <sub>2</sub> -C1	55	6,2	4,8	3,3	3,5	67	39

Apesar do bom desempenho em laboratório do produto comercial (Tabela 3), a procura por um recobrimento próprio era importante, visto que o referido produto é importado e, ainda, de custo elevado. Assim, procurou-se desenvolver um produto eficaz e de menor custo. Definiram-se dois traços de microconcretos base (ver Tabela 4) com duas concentrações diferentes de grafite. A cada um dos traços de microconcreto foram adicionadas nanopartículas e os corpos de prova confeccionados com os mesmos foram submetidos aos ensaios em laboratório. A

Tabela 5 e a Tabela 6 mostram os resultados obtidos.

Tabela 4 – Composição em massa do traço de microconcreto.

Componentes	T1 (%)	T2 (%)
Areia fina	43,9	42,1
Cimento	15,0	15,3
Grafite	12,0	16,0
Pedrisco	28,9	26,4
Plastificante	0,2	0,2
H <sub>2</sub> O	12,4(*)	15,6(*)

(\*) Valor percentual referente à massa total dos demais componentes.

Tabela 5 – Resistividade de corpos de prova após exposição em câmara climática a 28 °C e 20 % de UR.

Descrição sucinta	Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )			
	Início	7 dias	14 dias	21 dias
PC1	14	7	18	7
T1	3	3	12	2
T1 + 0,8 % $TiO_2$	6	5	12	3
T1 + 0,8 % $TiO_2$ -Al	6	5	8	4
T2	5	3	2	1
T2 + 0,8 % $TiO_2$	3	3	1	2
T2 + 0,8 % $TiO_2$ -Al	2	1	3	2
T2 + 0,2 % $SiO_2$ -H1	1	2	1	1
T2 + 0,8 % $SiO_2$ -H2	6	*	*	*

\* Erros de medida

Pela Tabela 5, verifica-se que os valores de resistividade dos microconcretos não apresentaram grandes flutuações durante o experimento em câmara climática, ao contrário do **PC1**. Pela

Tabela 6, pode-se verificar que a resistência de aterramento do cabo testemunho assumiu valores acima de 10 k $\Omega$ . O bloco de cobre, eletrodo de referência, assumiu valores próximos ou inferiores a 15 k $\Omega$ . Observa-se que entre os três recobrimentos sem nanopartículas (**PC1**, **T1** e **T2**), somente o **T1** apresentou um desempenho pior que o bloco de cobre. O **PC1** e o **T2** apresentaram um comportamento semelhante ao bloco de cobre. A adição de nanopartículas melhorou o desempenho dos recobrimentos desenvolvidos, sendo o melhor resultado aquele obtido com **T2 + 0,8 %  $SiO_2$ -H2**. Dentre os recobrimentos desenvolvidos, aqueles assinalados em cinza na Tabela 6 foram selecionados para serem submetidos aos experimentos em campo, pois os valores de resistência de aterramento obtidos foram inferiores ao do bloco de cobre.

Tabela 6 – Resistência de aterramento pelo método da queda de potencial nos experimentos de modelo reduzido de aterramento.

Descrição sucinta	Resistência de aterramento (k $\Omega$ )			
	Tempo (dias)			
	Início	7	21	28
Testemunho	30,4	46,5	99,9	10,8
Bloco de Cobre	8,2	10,3	15,4	9,3
PC1	8,4	9,1	12,9	7,5
T1	8,5	21,9	47,1	14,6
T1 + 0,8 % $TiO_2$	6,8	8,0	10,9	5,0
T1 + 0,8 % $TiO_2$ -Al	10,1	10,9	14,2	7,9
T2	8,2	10,2	14,0	7,6
T2 + 0,8 % $TiO_2$	7,6	8,0	10,3	5,8
T2 + 0,8 % $TiO_2$ -Al	7,0	7,9	10,6	6,1
T2 + 0,2 % $SiO_2$ -H1	6,5	11,0	17,1	7,6
T2 + 0,8 % $SiO_2$ -H2	5,4	4,3	3,4	3,3

A seleção dos locais para os experimentos em campo, foi feita analisando-se os resultados de medidas de resistência de aterramento de pé de torre de algumas torres da linha de transmissão Brasnorte/Parecis, de 230 kV (Tabela 7). A resistência total de cada torre é a resistência de um conjunto de quatro cabos contrapesos.

Tabela 7 – Comparação da resistência de aterramento total para cada torre entre 07.2010 e 11.2011.

Data Torre	Resistência de aterramento total ( $\Omega$ )				
	jul. 2010	out. 2010	fev. 2011	mar. 2011	ago. 2011
3	59,4	23,0	25,2	0,51(*)	63,6
21	130,0	33,6	34,7	-	-
111	12,4	9,4	12,3	9,0	9,72
174	1 150	54,6	72,3	-	536
214	-	20,4	37	42,9	77,9

(\*) houve contato físico com a estrutura metálica da torre de transmissão.

A região da Torre 214 foi selecionada para os experimentos por apresentar altos valores de resistência de aterramento e estar localizada próximo à subestação de Parecis, facilitando o acesso. Nesta região, foram instalados seis protótipos, a saber: cabo de aterramento (testemunho); cabo de aterramento + recobrimento **PC1** preparado conforme orientações do fabricante (**PC1**); cabo de aterramento + recobrimento **PC1** + 5 % de nanopartículas de sílica  $\text{SiO}_2\text{-C1}$  (**PC1 SiO<sub>2</sub>-C1**); cabo de aterramento + T1 + 0,8 %  $\text{TiO}_2$ ; cabo de aterramento + **T2 + 0,8 %  $\text{TiO}_2\text{-Al}$**  e cabo de aterramento + **T2 + 0,8 %  $\text{SiO}_2\text{-H2}$** . A Tabela 8 mostra os resultados das medidas de resistência de aterramento pelo método da queda de potencial dos protótipos instalados em campo.

Tabela 8 – Resistência de aterramento método da queda de potencial, protótipos próximos à Torre 214.

Descrição sucinta	Resistência de aterramento (kΩ)			
	Fev.	Jun.	Ago.	Set.
Testemunho	3,09	4,42	10,2	15,1
PC1	1,85	3,32	5,87	4,28
PC1 $\text{SiO}_2\text{-C1}$	3,27	3,86	29,5	7,56
T1 + 0,8 % $\text{TiO}_2$	1,98	0,71	1,17	1,66
T2 + 0,8 % $\text{TiO}_2\text{-Al}$	0,90	0,90	2,62	3,91
T2 + 0,8 % $\text{SiO}_2\text{-H2}$	-	0,88	1,68	1,60

Antes de analisar o desempenho dos diferentes produtos ensaiados, cabe chamar a atenção que os resultados apresentados na Tabela 8 devem ser analisados focando os meses de estiagem, visto que, quando o solo está úmido, não se tem problemas de escoamento de corrente e que nestas condições os cabos de aterramento sem recobrimento não apresentam problemas. Conforme já mencionado, os problemas surgem nos meses de estiagem durante os quais os solos arenosos ficam extremamente resistivos. Observando os dados da Tabela 8, conclui-se que o mês de setembro é o mais crítico. Nesse mês, claramente a resistência de aterramento é maior para o cabo testemunho. O produto comercial apresenta um valor menor que o testemunho, porém os produtos desenvolvidos com nanopartículas T1 + 0,8 %  $\text{TiO}_2$  e T2 + 0,8 %  $\text{SiO}_2\text{-H2}$  apresentam valores consideravelmente menores do que o do testemunho e do produto comercial.

Foram estimadas as resistências de aterramento de um sistema com quatro cabos cada qual com comprimento de 80 m utilizando eq. 1 para o cabo testemunho e a eq. 2 para os protótipos [27]:

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{4L}{d} - 2 + \frac{2d}{L} \right) \quad (1)$$

$$R = \frac{\rho}{2,73L} \log_{10} \frac{2L^2}{Wd} \quad (2)$$

Onde:  $\rho$  é a resistividade do solo em  $\Omega\cdot\text{cm}$ ;  $L$  é o comprimento do cabo de aterramento ou do paralelepípedo, em cm;  $a$  é o raio do cabo de aterramento, em cm;  $d$  é a profundidade na qual o eletrodo de aterramento se encontra, em cm e  $W$  é a largura do paralelepípedo, em cm.

A Tabela 9 mostra os dados estimados partindo dos valores apresentados na Tabela 8

Tabela 8. Alterando-se a configuração do eletrodo ou o comprimento, pode-se chegar a valores ainda mais baixos, mas verifica-se que, no mês de setembro, a redução obtida com os produtos contendo nanopartículas desenvolvidos foi substancial, chegando a valores 85 % inferiores ao do cabo testemunho.

Tabela 9. Resistência de aterramento método da queda de potencial, protótipos próximos à Torre 214, extrapolação para quatro cabos de 80 m.

Descrição sucinta	Resistência de aterramento (Ω)			
	Fev.	Jun.	Ago.	Set.
Testemunho	63	42	208	308
PC1	86	193	222	189
PC1 $\text{SiO}_2\text{-C1}$	92	235	1544	61
T1 + 0,8 % $\text{TiO}_2$	59	21	35	49
T2 + 0,8 % $\text{TiO}_2\text{-Al}$	27	27	78	116
T2 + 0,8 % $\text{SiO}_2\text{-H2}$	-	26	50	47

#### 4.0 CONCLUSÃO

Os resultados deste desenvolvimento são inovadores e trazem uma opção para a redução da resistência de aterramento. A tecnologia desenvolvida provê as condições necessárias para um adequado aterramento das estruturas instaladas em solos de alta resistividade, especialmente onde as soluções disponíveis até então não são eficazes ou representam custos elevados. Este desenvolvimento permite projetar sistemas capazes de garantir uma vida útil maior ao sistema, especialmente para as concessionárias que operam linhas de transmissão instaladas em regiões de solos arenosos. Os novos projetos de aterramento com base nesta tecnologia deverão minimizar as intervenções de manutenção corretivas dos sistemas e consequentemente as ações mitigadoras.

## 5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) G. Radhika and M. Suryakalavathi, "Back flashover Analysis Improvement of a 220 kV Transmission," *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, vol. 3, pp. 533-536, 2013.
- (2) B. Marungsri, S. Boonpoke, A. Rawangpai, A. Oonsivilai, and C. Kritayakornupong, "Study of Tower Grounding Resistance Effected Back Flashover to 500 kV Transmission Line in Thailand by using ATP/EMTP " *International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering*, vol. 2, pp. 97-104, 2009.
- (3) (2002, 14.07.2014). PJM design and application of overhead transmission lines 69kV and above, Transmission owner guidelines. Section V.A, 12. Available: <http://www.pjm.com/planning/design-engineering/maac-to-guidelines.aspx>
- (4) A. N. D. E. E.-. ANEEL, "RESOLUÇÃO NORMATIVA N°270 DE 26 DE JUNHO DE 2007," ed, 2007.
- (5) A. Purnomoadi, R. Siregar, and Y. Hakim, "Application of transmission line arresters (TLAs) in high flash density area to improve transmission line performance," presented at the 17th Conference on electric power supply, Macau SAR, China, , 2008.
- (6) S. C. Lim, C. Gomes, and M. Z. A. A. Kadir, "Preliminary grounding Performance of Bentonite Mixed Concrete Encased steel Cage under high soil resistivity Condition," presented at the 8th 2013 Asia-Pacific International Conference on Lightning, Seoul, Korea, 2013.
- (7) S. R. C. Bezerra, "Avaliação de sistemas de aterramento considerando a utilização de condutores e hastes envolvidos em concreto.," Mestrado em Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2011.
- (8) S. C. Lim, C. Gomes, and M. Z. A. A. Kadir, "Characterizing of Bentonite with Chemical, Physical and Electrical Perspectives for Improvement of Electrical Grounding Systems " *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 8, pp. 11429-11447, 2013.
- (9) E. J. Fagan and R. H. Lee, "G-The use of concrete enclosed reinforcing rods as grounding electrodes," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY AND GENERAL APPLICATIONS*, vol. IGA-6, pp. 337-348, 1970.
- (10) J. Trifunovic, "The Algorithm for Determination of Necessary Characteristics of Backfill Materials Used for Grounding Resistances of Grounding Loops Reduction," *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, vol. 63, pp. 373-379, 2012.
- (11) A. Burbelo and J. M. Tobias, "Earth Grounding and Bonding Pamphlet - A Guide to Propoer Earth Grounding and Bonding Methods for Use with Tactical Systems," U.S. Army Communications-Electronics Command (CECOM), Fort Monmouth, New Jersey1998.
- (12) N. A. A. Rahman, A. M. A. Marican, and A. M. Davies, "Tower earthing design to reduce faults in transmission lines due to lightning," presented at the 17th Conference of Electric Power Supply Industry (CEPSI 2008), 2008.
- (13) R. B. Carpenter Jr and J. A. Lanzoni, "Designing for a Low Resistance Earth Interface (Grounding)," ed: LEC Publication, 2007, p. 16.
- (14) M. Loboda and R. Marciniak, "Spractical Application of Enhancement Materials in High Resistivity Soils," presented at the International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International conference on Lightning Physics and Effects, Florianopolis - Brazil, 2008.
- (15) N. Radovanovic, M. Savic, M. Kostic, and J. Cvetic, "Behaviour of the Grounding Loop Backfilled with Bentonite Exposed to Lightning Impulse Currents," *Journal of Lightning Research (JOLR)*, vol. 1, pp. 9-16, 2008.
- (16) W. K. Switzer and C. R. Stidham, "Long Duration Ground Electrode Performance Program," ed. United States of America: ERICO, Inc, p. 8.
- (17) H. Yamane, T. Ideguchi, and M. Tokuda, "Fundamental Characteristics for Ground-Resistance Reducing Material Using Water-Absorbent Polymer," in *Eletronics and Communications in Japan, Part 2* vol. 77, ed. Kumamoto, Japan, 1994, pp. 219-226.
- (18) D. J. William, "Technical Bulletin - Application of 250.50, Grounding Electrode System and 250.52 (A) (3) Concrete-Encased Electrode," B. o. E. S. a. Licensing, Ed., ed: State of New Hampshire Department of Safety, 2005, p. 4.
- (19) J. M. SILVA and R. M. RIBAS, "Desenvolvimento de um Eletrodo de Terra com Baixíssima Resistência para ser Instalado em Solos de Alta Resistividade," presented at the XIII Eriac Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.
- (20) G. Eduful, J. E. Cole, and P. Y. Okyere, "Optimum Mix of Ground Electrodes and Conductive Backfills to Achieve a Low Ground Resistance," in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, USA, 2009, p. 6.
- (21) E. Petrache, W. A. Chisholm, and A. Phillips, "Evaluating the Transient Impedance of Transmission Line Towers," presented at the IX International Symposium on Lightning Protection (IX SIPDA), Foz do Iguaçu, Brazil, 2007.
- (22) A. J. Phillips, F. F. Bologna, and T. Shaw, "HECO Lightning Performance Analysis: Kahe-Waiiau 138 kV line," Palo Alto, CA2009.
- (23) D. Tavakoli and A. Heidari, "Properties of concrete incorporating silica fume and nano-SiO2," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 6, pp. 3946-3950, 2013.
- (24) A. Nazari, S. Riahi, S. Riahi, S. F. Shamekhi, and A. Khademno, "Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO2 nanoparticles," *Journal of American Science*, vol. 6, pp. 43-46, 2010.