



Copyright 2016, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2016, em Búzios/RJ no mês de maio de 2016.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Influência da variação anual da resistividade elétrica do solo no desempenho de sistema de proteção catódica de dutos terrestres

José Leonardo Resende^a

Abstract

One of field parameters collected for the preparation of cathodic protection design of buried pipelines is the electrical soil resistivity of duct nesting sites and anode beds. This parameter influences mainly on demand density of electric current and the electrical resistance of the sacrificial material in contact with the ground. This study aims to evaluate the weekly performance of the variation of soil resistivity and its impact on the design and cathodic protection system performance for one year in the depths practiced by designers. It known that the soil is a generally heterogeneous medium, so that the value of resistivity varies from location to location depending on the type, humidity level, the depth of the layers, age geological formation, temperature, salinity and other natural factors also being affected by external factors such as contamination and compaction. The results show that the soil resistivity variation reached about 85 %, and the electrical current injected by some rectifiers reduced by 37 %, thus requiring adjustments to the rectifiers to maintain the level of cathodic protection during periods of elevated soil resistivity.

Keywords: performance, cathodic protection, soil resistivity.

Resumo

Um dos parâmetros de campo levantado para a elaboração de projeto de proteção catódica de dutos enterrados é a resistividade elétrica do solo dos sítios de assentamento do duto e dos leitos de anodos. Esse parâmetro influencia, principalmente, na demanda densidade de corrente elétrica e na resistência elétrica do material de sacrifício em contato com o solo. Este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento semanal da variação da resistividade do solo e seu impacto no projeto e no desempenho de sistema de proteção catódica durante um ano nas profundidades praticadas pelos projetistas. Sabe-se que o solo é um meio geralmente heterogêneo, de modo que o valor de sua resistividade varia de local para local em função do tipo, nível de umidade, profundidade das camadas, idade de formação geológica, temperatura, salinidade e outros fatores naturais, sendo também afetado por fatores externos como contaminação e compactação. Os resultados mostram que a variação de resistividade do solo alcançou cerca de 85 % e a corrente elétrica injetada por alguns retificadores reduziu cerca de 37 %, exigindo assim ajustes nos retificadores para manter o nível de proteção catódica nos períodos de elevação da resistividade do solo.

^aSupervisor técnico de gás - GASMIG

Palavras-chave: desempenho, proteção catódica, resistividade do solo.

Introdução

Após o início do monitoramento remoto de alguns retificadores de proteção catódica notou-se que determinados sistemas sofriam grandes variações de corrente elétrica ao longo do ano, mesmo com a tensão de saída constante. Uma das variáveis que impacta diretamente no valor de corrente é a resistividade elétrica do solo do sítio de acomodação dos anodos de sacrifícios, influenciando tanto na resistência do circuito quanto na demanda de corrente necessária para proteger contra corrosão eletrolítica um sistema de dutos enterrados.

A resistividade do solo é dependente das características físico-químicas do tipo de solo, do nível de umidade, da profundidade das camadas, da intervenção humana e de outros fatores naturais. Dessa forma, a norma [1] exemplifica valores típicos de resistividades em função de alguns desses parâmetros, sobretudo em relação ao teor de umidade retida no solo, à salinidade e à temperatura. Além disso, a resistividade é um dos parâmetros de base para diversos processos elétricos, tais como: projeto de sistemas de aterramentos, estudos de interferências eletromagnéticas em dutos enterrados, projetos de sistemas de proteção catódica, etc.

Assim sendo, este trabalho tem como objetivo levantar a curva de variação da resistividade do solo durante um ano e quantificar seu impacto na demanda de corrente de proteção catódica de novos projetos e dos sistemas em operação.

Metodologia

Para o levantamento dos valores de resistividades do solo adotou-se o Método dos quatro eletrodos - Arranjo dos quatro pontos igualmente espaçados ou arranjo de Wenner [1] [2] com medições semanais nas distâncias típicas de projeto de proteção catódica, isto é, 1,5 m, 3,0 m, 4,5 m e 6,0 m durante o período de 1 ano. A Figura 1 retrata o local do ensaio. Assim, para garantir que as medições fossem realizadas sempre no mesmo local, demarcou-se as distâncias anteriores com estacas de madeira e a irrigação foi abolida no período de ensaio para evitar sua influência na umidade do solo.

O instrumento utilizado para o levantamento de campo foi o Conjunto Testador de terra Fluke 1625, calibrado em 22/01/2014.

No dimensionamento de um sistema de proteção catódica por corrente impressa, a resistência do circuito é basicamente a resistência de contato anodo/eletrolito, principalmente em eletrolitos de resistividade média e alta [2]. Para a configuração de vários anodos enterrados, a resistência do circuito é dada pelas Equação 1 e 2. Sendo a Equação 1 para anodos dispostos verticalmente e a Equação 2 para a disposição horizontal.

$$R_{AV} = \frac{\rho}{2\pi N L} \left(\ln \frac{8L}{D} - 1 + \frac{2L}{S} \ln 0,656N \right) \quad (1)$$

Em que:

R_{AV} – resistência dos diversos anodos verticais dispostos em linha reta e com espaçamento uniforme [Ω]

ρ – resistividade do solo [Ωcm]

N – número de anodos em paralelo

L – comprimento de cada anodo [cm]

D – diâmetro de cada anodo [cm]

S – espaçamento entre os anodos [cm]

$$R_{AH} = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L^2}{DS} - 2 \right) \quad (2)$$

Em que:

R_{AH} – resistência dos diversos anodos na posição vertical [Ω]

ρ – resistividade do solo [Ωcm]

L – comprimento de cada anodo [cm]

D – diâmetro de cada anodo [cm]

S – dobro da profundidade em que o anodo será enterrado [cm]



Figura 1 – Local do ensaio de medição de resistividade do solo

Pelas Equações 1 e 2 observa-se que a resistência do circuito é diretamente proporcional a resistividade elétrica do solo. Então, nos sistemas analisados, os valores de resistência de cada sistema foram considerados como parâmetro de correção para o valor da resistividade do solo de projeto de cada leito de anodo analisado, pois retratam o comportamento do solo no período.

A corrente de proteção é dada pela Equação 3 [2]. Já a densidade de corrente de proteção é dada pela Equação 4 [2]. Observa-se que no cálculo da densidade de corrente a única variável é a resistividade do solo de acomodação da estrutura a proteger.

$$I = S \cdot j \cdot (1 - E) \quad (3)$$

Em que:

- I – intensidade de corrente [A]
 S – área total da superfície a proteger [m²]
 j – densidade de corrente de proteção [A/m²]
 E – eficiência do revestimento [fração decimal]

$$j = 73,73 - 13,35 \log \rho \quad (4)$$

Em que:

- j – densidade de corrente de proteção [A/m²]
 ρ – resistividade do solo [Ω cm]

De posse dos dados levantados em campo e dos históricos de monitoramento remoto dos retificadores de proteção catódica de 4 sistemas da Companhia de Gás de Minas Gerais (GASMIG), comparou-se seus dados de média mensal de resistência elétrica do circuito e de corrente de proteção com os valores de projeto. Em seguida, quantificou-se o acréscimo/decaimento de tensão de saída necessário para manter o nível mínimo de potencial de proteção catódica ao longo do ano. A Tabela 1 retrata as principais características dos sistemas de proteção catódica estudados.

Tabela 1 - Características dos sistemas de proteção catódica analisados

Local	Modelo do retificador	Material anodo	Número de anodos	Posição dos anodos	Profundidade [m]	Tipo de solo [3]	Tipo de cobertura do leito
Hum - Brumadinho	100V-10A	Ti	32	Vertical	2,0	Neossolo litólico distrófico	Solo natural
Embrapa - Sete Lagoas	100V-10A	Fe-Si-Cr	14	Vertical	1,5	Latossolo vermelho distrófico	Solo natural
Rio Piracicaba	100V-10A	Ti	18	Vertical	1,5	Latossolo vermelho-amarelo distrófico	Solo natural Sombreado
Av. Cristiano Machado - BH	100V-30A	Ti	25	Horizontal	1,5	Argissolo vermelho-amarelo distrófico	Asfalto

Resultados e discussão

O perfil de resistividade do solo semanal obtido pelo Método dos quatro eletrodos de Wenner no período de agosto/2014 a julho/2015 é retratado na Figura 2. Observa-se que as frações do ano que apresentaram as menores magnitudes foram: primeira quinzena de dezembro, segunda quinzena de fevereiro, mês de março com valor mínimo anual de 76,84 Ω .m e primeira quinzena de maio, pois houve considerável quantidade de chuva no período e o solo estava bastante úmido durante as medições. Entretanto, o valor da resistividade do solo aumenta significativamente a partir do final da estação chuvosa até o início da próxima tendo em vista a queda na umidade retida no solo, isto é, de junho até a primeira quinzena de

outubro, que apresentou o valor máximo de 348,35 Ω .m. Nota-se que a diferença entre as magnitudes máxima e mínima é cerca de 453%. Portanto, o intervalo do mês setembro até a primeira quinzena de outubro torna-se ideal para dimensionar a maior resistência de contato dos anodos com o eletrólito para a região do ensaio.

Já para dimensionar a maior quantidade de corrente necessária para a proteção de um duto enterrado nesta mesma região, os meses de solos úmidos são mais convenientes por apresentarem os menores gradientes, tais como, segunda quinzena de dezembro, fevereiro e março.

A média anual ficou em torno de 161,58 Ω .m. Dessa forma, a variação máxima foi de cerca de 85,0 % e a mínima, 39,0 %, respectivamente em setembro e maio, em relação à média anual. Os meses que o valor médio mensal da resistividade se aproxima da média anual são os meses de janeiro e junho. Caso opte por dimensionar a partir da média anual, esses meses tornam-se bastantes representativos.

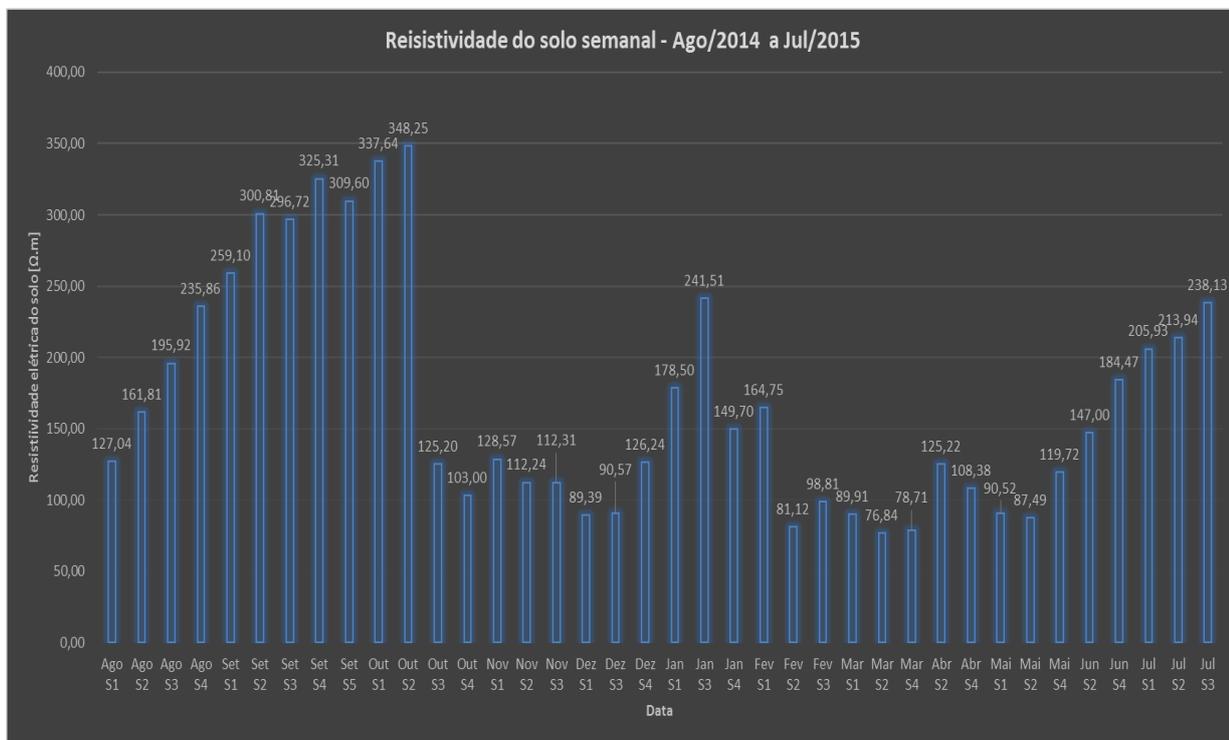


Figura 2 – Resistividade do solo semanal de agosto/2014 a julho/2015

Agora, comparando as resistividades em relação a cada profundidade ensaiada, a amplitude é menor à medida que se aprofunda por haver maior percentual de umidade retida como pode ser constatado na Figura 3. Assim, as magnitudes médias para as profundidades de 1,5 m, 3,0 m, 4,5 m e 6,0 m são, respectivamente, 407,46 Ω .m, 213,63 Ω .m, 145,08 Ω .m, 99,78 Ω .m. Nota-se que é mais vantajoso para a dispersão de corrente optar por acomodar os anodos numa profundidade maior que 3,0 m, por apresentarem menores amplitudes de resistividade do solo e pelo fato desse valor aproximar da média anual (161,58 Ω .m).

Calculando a corrente de proteção a partir dos valores corrigidos de resistividade do solo ba-

seados nos dados de projeto em relação à resistência de contato do leito de anodos para os quatros sistemas em estudo, obtém-se na Tabela 2 os dados para o gasoduto Brumadinho-Nova Lima (Sistema 1); na Tabela 3, gasoduto São José da Lapa-Sete Lagoas (Sistema 2); na Tabela 4, gasoduto Mariana-Belo Oriente (Sistema 3); e na Tabela 5, gasoduto Belo Horizonte-São José da Lapa (Sistema 4). As resistividades do solo para os dutos foram consideradas constantes e iguais as dos respectivos projetos por ser a média de diversos solos e por haver trechos do gasoduto em leitos de rios e brejos.

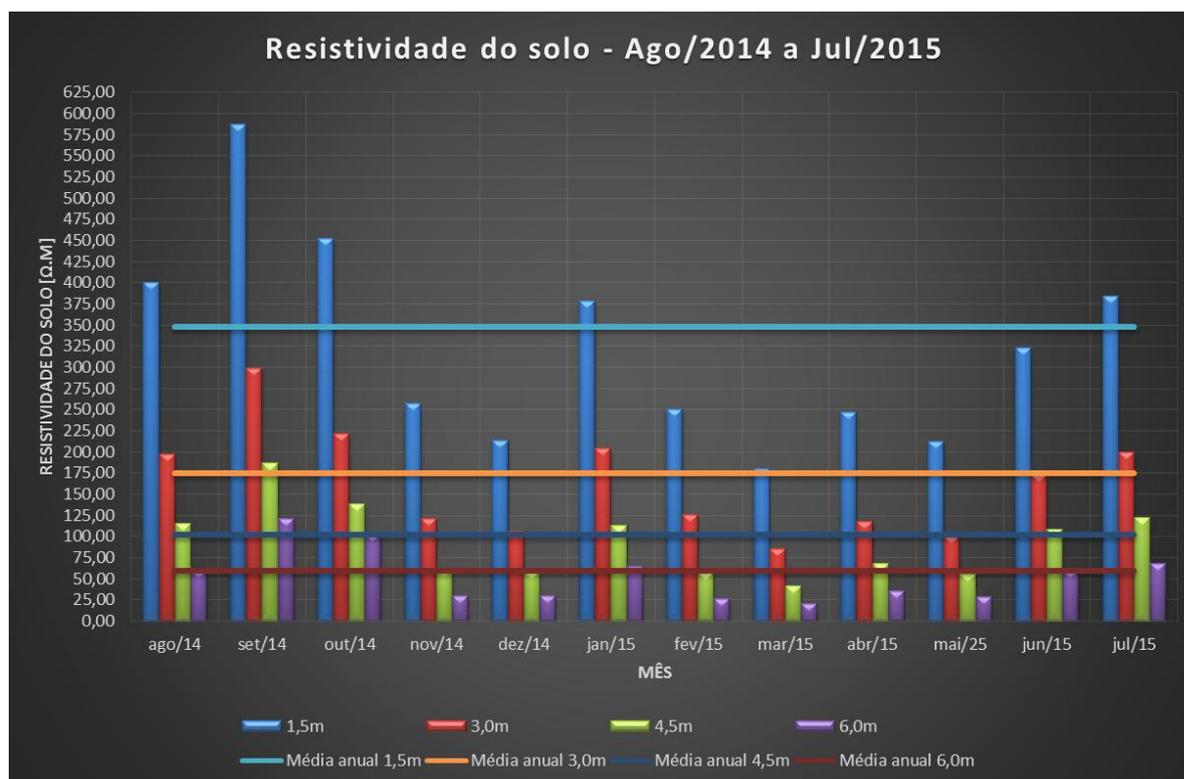


Figura 3 – Resistividade do solo média mensal por profundidade

Na Tabela 2 observa-se que a deficiência de corrente de proteção do Sistema 1, cujo solo é neossolo litólico distrófico [3] [4], alcançou cerca de 24 % nos meses de setembro e outubro e o excesso, 50 %, que ocasionou a superproteção, nos meses de março e abril. Portanto, deveria aumentar a tensão de saída nos meses de setembro e outubro em cerca de 30 %, reduzi-la em dezembro para o patamar anterior e no final de fevereiro efetuar uma nova redução de 33 % com posterior aumento a partir de meado de maio. Nota-se também que nos meses de janeiro, julho e dezembro, as resistividades aproximam-se da média anual.

Para o Sistema 2 a deficiência de corrente de proteção alcançou cerca de 37 % em novembro e dezembro, e o excesso, 28 % em fevereiro, conforme Tabela 3. Nota-se que os meses que apresentaram valores máximo e mínimo diferem do caso anterior, justamente por ser um outro tipo de solo, latossolo vermelho distrófico [3] [5], com características e comportamento distintos quanto a retenção e escoamento de água. Além disso, há variação nos períodos de chuvas e nas suas quantidades por ser regiões distantes, mais de 100 km.

Neste caso, deveria aumentar a tensão de saída nos meses de outubro e novembro em cerca de

52 %, reduzi-la em dezembro para o patamar anterior e em janeiro efetuar uma nova redução de 22 % com posterior aumento a partir de meado de maio. Nota-se também que nos meses de maio e junho, as resistividades aproximam-se da média anual.

Tabela 2 - Sistema de proteção catódica 1 Gasoduto Brumadinho-Nova Lima

Mês	Resistividade do eletrólito duto [ohm.cm]	Resistividade do eletrólito leito corrigida [ohm.cm]	Densidade de corrente [mA/m ²]	Resistência de contato do leito Vertical [ohm]	Corrente projetada [A]	Tensão de saída [V]	Corrente medida [A]	Diferença de corrente
ago/14	73.336,55	423.277,98	8,78	48,65	0,25	9,73	0,20	-19,96%
set/14	73.336,55	445.555,77	8,78	51,21	0,25	9,73	0,19	-23,96%
out/14	73.336,55	435.929,92	8,78	50,10	0,25	9,62	0,19	-23,16%
nov/14	73.336,55	412.725,92	8,78	47,44	0,25	9,44	0,20	-20,36%
dez/14	73.336,55	328.080,31	8,78	37,71	0,25	9,05	0,24	-3,95%
jan/15	73.336,55	342.722,95	8,78	39,39	0,25	9,06	0,23	-7,95%
fev/15	73.336,55	279.315,16	8,78	32,10	0,25	9,31	0,29	16,06%
mar/15	73.336,55	229.376,09	8,78	26,36	0,25	9,86	0,37	49,67%
abr/15	73.336,55	238.012,92	8,78	27,36	0,25	9,52	0,35	39,27%
mai/25	73.336,55	255.507,54	8,78	29,37	0,25	9,28	0,32	26,46%
jun/15	73.336,55	288.880,45	8,78	33,20	0,25	9,33	0,28	12,46%
jul/15	73.336,55	330.136,50	8,78	37,94	0,25	9,60	0,25	1,25%
Média	73.336,55	334.126,79	8,78	38,40	0,25	9,46	0,26	-

Tabela 3 - Sistema de proteção catódica 2 Gasoduto São José da Lapa-Sete Lagoas

Mês	Resistividade do eletrólito duto [ohm.cm]	Resistividade do eletrólito leito corrigida [ohm.cm]	Densidade de corrente [mA/m ²]	Resistência de contato do leito Vertical [ohm]	Corrente projetada [A]	Tensão de saída [V]	Corrente medida [A]	Diferença de corrente
ago/14	18.789,24	11.667,27	16,67	25,01	2,09	45,51	1,82	-13,05%
set/14	18.789,24	12.928,73	16,67	27,71	2,09	45,72	1,65	-21,17%
out/14	18.789,24	14.819,88	16,67	31,76	2,09	45,42	1,43	-31,68%
nov/14	18.789,24	16.037,20	16,67	34,37	2,09	45,37	1,32	-36,93%
dez/14	18.789,24	9.336,43	16,67	20,01	2,09	45,40	2,27	8,40%
jan/15	18.789,24	7.911,06	16,67	16,96	2,09	45,50	2,68	28,21%
fev/15	18.789,24	8.916,50	16,67	19,11	2,09	45,70	2,39	14,26%
mar/15	18.789,24	9.570,29	16,67	20,51	2,09	45,74	2,23	6,54%
abr/15	18.789,24	8.765,33	16,67	18,79	2,09	45,65	2,43	16,10%
mai/25	18.789,24	11.198,12	16,67	24,00	2,09	45,84	1,91	-8,75%
jun/15	18.789,24	11.401,31	16,67	24,44	2,09	45,45	1,86	-11,13%
jul/15	18.789,24	10.871,27	16,67	23,30	2,09	45,90	1,97	-5,88%
Média	18.789,24	11.118,62	16,67	23,83	2,09	45,60	1,91	-

No Sistema 3 a deficiência de corrente de proteção alcançou cerca de 20 % entre os meses de agosto e setembro, e o excesso, 32 % em janeiro, conforme Tabela 4. Apesar do tipo de solo ser semelhante ao do Sistema 2, este sistema possui um comportamento diferente na periodicidade de menor e maior corrente de proteção. Tal leito situa em rodovia não pavimentada coberta por diversas árvores, que mantém certa umidade no solo, além de situar em região distinta dos demais, o que leva a um outro perfil de retenção e escoamento de água no solo.

Neste caso, seria necessário aumentar a tensão de saída nos meses de agosto e setembro em cerca de 24 %, reduzi-la em novembro para o patamar anterior e em janeiro efetuar uma nova redução de 24 % com posterior aumento a partir de março. Nota-se também que nos meses de junho e julho, as resistividades aproximam-se da média anual.

Tabela 4 - Sistema de proteção catódica 3 Gasoduto Mariana-Belo Oriente

Mês	Resistividade do eletrólito duto corrigida [ohm.cm]	Resistividade do eletrólito leito corrigida [ohm.cm]	Densidade de corrente [mA/m ²]	Resistência de contato do leito Vertical [ohm]	Corrente projetada [A]	Tensão [V]	Corrente medida [A]	Diferença de corrente
ago/14	153.339,36	32.160,11	4,50	14,70	0,63	7,54	0,51	-18,86%
set/14	153.339,36	31.959,77	4,50	14,61	0,63	7,42	0,51	-19,65%
out/14	153.339,36	28.214,74	4,50	12,89	0,63	7,35	0,57	-9,84%
nov/14	153.339,36	22.878,23	4,50	10,46	0,63	7,34	0,70	11,04%
dez/14	153.339,36	22.878,23	4,50	10,46	0,63	7,39	0,71	11,80%
jan/15	153.339,36	19.365,18	4,50	8,85	0,63	7,38	0,83	31,90%
fev/15	153.339,36	22.840,23	4,50	10,44	0,63	7,39	0,71	11,98%
mar/15	153.339,36	23.571,32	4,50	10,77	0,63	7,41	0,69	8,80%
abr/15	153.339,36	23.913,99	4,50	10,93	0,63	7,46	0,68	7,97%
mai/15	153.339,36	23.759,95	4,50	10,86	0,63	7,47	0,69	8,81%
jun/15	153.339,36	24.359,12	4,50	11,13	0,63	7,47	0,67	6,14%
jul/15	153.339,36	26.320,40	4,50	12,03	0,63	7,54	0,63	-0,85%
Média	153.339,36	25.185,11	4,50	11,51	0,63	7,43	0,65	-

No último sistema em estudo, Sistema 4, observa-se que a deficiência de corrente de proteção alcançou cerca de 7 % em agosto e setembro, e o excesso, 46 % em abril, conforme Tabela 5. O tipo de solo, argissolo vermelho-amarelo distrófico [3] [6], é diferente dos demais casos bem como seu perfil de retenção e escoamento de água. O comportamento deste sistema é singular, pois praticamente não houve falta de corrente de proteção, mas sim, apenas sobrecorrente. O leito situa-se em área urbana com cobertura de asfalto e com os anodos alocados horizontalmente. Dessa forma, deveria reduzir a corrente em cerca de 31 % entre março e abril para diminuir os efeitos da superproteção. Assim, a partir de agosto necessitaria elevar a corrente para o patamar anterior. Neste caso, nota-se também que nos meses de maio e junho, as resistividades aproximam-se da média anual.

Para todos os casos, o perfil de potencial duto-solo também não foi levantado até o momento

e será realizado a partir do segundo semestre de 2016, o que permitirá uma análise mais refinada do impacto das oscilações de corrente e proporcionará melhores ajustes de tensões.

Tabela 5 - Sistema de proteção catódica 4 Gasoduto Belo Horizonte-São José da Lapa

Mês	Resistividade e do eletrólito duto [ohm.cm]	Resistividade do eletrólito leito corrigida [ohm.cm]	Densidade de corrente [mA/m ²]	Resistência de contato do leito Horizontal [ohm]	Corrente projetada [A]	Tensão de saída [V]	Corrente medida [A]	Diferença de corrente
ago/14	17.381,17	15.266,53	17,12	6,74	8,34	52,33	7,76	-6,92%
set/14	17.381,17	15.237,36	17,12	6,73	8,34	52,23	7,76	-6,92%
out/14	17.381,17	14.990,56	17,12	6,62	8,34	51,98	7,85	-5,84%
nov/14	17.381,17	14.610,15	17,12	6,45	8,34	50,79	7,87	-5,60%
dez/14	17.381,17	11.268,99	17,12	6,45	8,34	51,47	7,98	-4,34%
jan/15	17.381,17	11.978,77	17,12	4,98	8,34	51,59	10,36	24,31%
fev/15	17.381,17	10.417,86	17,12	5,29	8,34	51,31	9,70	16,31%
mar/15	17.381,17	9.736,35	17,12	4,60	8,34	51,05	11,09	33,06%
abr/15	17.381,17	10.411,80	17,12	4,30	8,34	52,20	12,14	45,58%
mai/15	17.381,17	12.311,40	17,12	4,60	8,34	52,37	11,39	36,58%
jun/15	17.381,17	13.718,84	17,12	5,44	8,34	52,60	9,67	16,01%
jul/15	17.381,17	14.549,50	17,12	6,06	8,34	52,70	8,70	4,31%
Média	17.381,17	12.874,84	17,12	5,69	8,34	51,89	9,12	-

Conclusões

Conclui-se que a resistividade do solo varia consideravelmente ao longo do ano, alcançando diferença de cerca de 85,0 % entre a máxima e a média, e 50,0 % entre a mínima e a média para o solo ensaiado. Esta variação impacta, principalmente, na resistência de contato do leito de anodos com o solo e na demanda de corrente de proteção, que dependendo do tipo de solo e do período de chuvas provoca deficiência de até 37,0 % e sobreproteção de até 50,0 % nos sítios analisados. Além disso, observa-se que a cobertura asfáltica e o sombreamento de árvores influenciam no escoamento de água pelo solo acarretando outro comportamento no perfil de retenção de água, e conseqüentemente, nas variáveis que dependem da resistividade do solo.

O ensaio mostrou ainda, que a amplitude da resistividade é menor para profundidades maiores, principalmente, as superiores a 3,0 m. Então, a fim de minimizar a variação da resistência de contato do leito, os anodos devem ser alocados em profundidades superiores a esta.

Nota-se também que os meses em que as resistividades se aproximam da média anual são basicamente os meses de maio a julho, independente do tipo de solo. Logo, medir a resistividade nesse período diminui consideravelmente as variações de resistência do circuito.

Referências bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117**: medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012.
- [2] DUTRA, Aldo; NUNES, Laerce. **Proteção Catódica**: Técnica de combate à corrosão. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011. 344p.
- [3] FEAM. **Banco de solos de Minas Gerais**. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>>. Acesso: 06 jan 2016. 17:10:25.
- [4] AGEITEC. **Neossolos litólicos**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn230xho02wx5ok0liq1mqxhk6vk7.html>. Acesso: 21 jan 2016. 17:30:05.
- [5] AGEITEC. **Latossolos**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_96_10112005101956.html>. Acesso: 21 jan 2016. 17:30:05.
- [6] AGEITEC. **Argissolos vermelho-amarelos**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn0pzmhe02wx5ok0liq1mqk4130gy.html>. Acesso: 25 jan 2016. 16:50:15.