

Energia Elétrica e Sustentabilidade 2

Jaqueline Oliveira Rezende
(Organizadora)



Atena
Editora

Ano 2018

JAQUELINE OLIVEIRA REZENDE

(Organizadora)

Energia Elétrica e Sustentabilidade

2

Atena Editora
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E56	Energia elétrica e sustentabilidade 2 [recurso eletrônico] / Organizadora Jaqueline Oliveira Rezende. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. – (Energia Elétrica e Sustentabilidade; v. 2) Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-85107-46-8 DOI 10.22533/at.ed.468180110 1. Desenvolvimento energético – Aspectos ambientais. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Energia elétrica. I. Rezende, Jaqueline Oliveira. CDD 338.4
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

O conteúdo do livro e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A sustentabilidade pode ser entendida como a capacidade de o ser humano utilizar os recursos naturais para satisfazer as suas necessidades sem comprometer esses recursos para atender as gerações futuras. Nesse contexto, a sustentabilidade está inter-relacionadas em diversos setores, sendo os principais o social, o ambiental e o econômico. Dessa forma, constitui um dos desafios da sociedade moderna o desenvolvimento sustentável que objetiva preservar o meio ambiente durante a realização de outras atividades.

A energia elétrica representa um dos principais pilares para o progresso econômico de uma nação e, conseqüentemente, para o atendimento de inúmeras necessidades da humanidade. Portanto, esse setor também tem se preocupado com a geração, a transmissão, a distribuição de energia elétrica e a construção de novos empreendimentos, como as usinas hidrelétricas, de maneira a preservar o meio ambiente. Logo, a Engenharia Elétrica tem apresentado significativas pesquisas e resultados de ações pautadas na sustentabilidade.

Neste ebook é possível notar que a relação da Engenharia Elétrica e a Sustentabilidade é de preocupação de diversos profissionais envolvidos nesse setor, sendo esses advindos da academia, das concessionárias de energia elétrica e do governo. Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e resultados práticos de diferentes formas de aplicação da preservação do meio ambiente na engenharia elétrica.

Inicialmente são apresentados artigos que discorrem sobre o desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade ambiental, custos ambientais em empreendimentos de geração de energia elétrica, recuperação ambiental, conservação da fauna, políticas administrativas e direcionamento de resíduos eletrônicos.

Em seguida, são descritos estudos sobre formas de geração de energia elétrica renováveis não convencionais, sendo apresentadas a energia eólica e a energia solar fotovoltaica. Essas formas de geração contribuem para o desenvolvimento sustentável, uma vez que geram energia elétrica utilizando recursos naturais não finitos, o vento na geração eólica e o sol na geração fotovoltaica.

Além disso, neste exemplar são expostos artigos que contemplam diversas áreas da engenharia elétrica, como redes smart grids, sistema de proteção, operação remota de usinas hidrelétricas, inteligência computacional aplicada a usina termelétrica, transformadores de potência, linhas de transmissão, tarifa horária, lâmpadas led, prevenção de acidentes em redes de média tensão e eficiência energética.

Jaqueline Oliveira Rezende

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
PROSPECÇÃO DE PARQUES HIDROKINÉTICOS ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE PROJETOS NOS RIOS IGUAÇU E PARANÁ	
<i>Marcos Aurélio de Araujo</i>	
CAPÍTULO 2	10
TROCADOR DE CALOR – INOVAÇÃO NO AQUECIMENTO DE ÁGUA, FUNCIONAMENTO, RESULTADOS E COMPARAÇÃO COM TECNOLOGIAS SEMELHANTES	
<i>Odair Deters</i>	
<i>Paulo Valdocci Pereira</i>	
<i>Valério Monteiro</i>	
CAPÍTULO 3	23
SISTEMA ÓPTICO CWDM COMO PLATAFORMA DE MONITORAÇÃO DE ATIVOS E DE COMUNICAÇÃO DE DADOS PARA REDES SMART GRIDS	
<i>João Batista Rosolem</i>	
<i>Danilo César Dini</i>	
<i>Claudio Antonio Hortêncio</i>	
<i>Eduardo Ferreira da Costa</i>	
<i>Rivael Strobel Penze</i>	
<i>João Paulo Vicentini Fracarolli</i>	
<i>Carlos Alexandre Meireles Nascimento</i>	
<i>Vítor Faria Coelho</i>	
CAPÍTULO 4	37
PORTAL OPERACIONAL DE EQUIPAMENTOS ESPECIAIS DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO - UMA FERRAMENTA PARA GESTÃO DA CONFORMIDADE E DA CONTINUIDADE NO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	
<i>Rafael Cassiolato de Freitas</i>	
<i>Sadi Roberto Schiavon</i>	
CAPÍTULO 5	46
MODERNIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DA USINA HIDRELÉTRICA DE SAMUEL	
<i>Davi Carvalho Moreira</i>	
<i>Daniel Simões Pires</i>	
<i>Danilo Gomes Matias</i>	
<i>Heleno Fülber</i>	
<i>Bruno Merlin</i>	
CAPÍTULO 6	62
OPERAÇÃO REMOTA DE USINAS PELO CENTRO DE OPERAÇÃO DA GERAÇÃO DA ELETROBRAS ELETRONORTE	
<i>Davi Carvalho Moreira</i>	
<i>Daniel Simões Pires</i>	
<i>Danilo Gomes Matias</i>	
<i>Juliano Cortes de Souza</i>	
<i>Leonardo Siqueira Rodrigues</i>	
<i>Heleno Fülber</i>	
<i>Bruno Merlin</i>	
CAPÍTULO 7	70
ABORDAGEM DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL APLICADA PARA MODELAGEM PREDITIVA DE EMISSÕES DE NOX E CO DE UMA TURBINA A GÁS DE UMA USINA TERMELÉTRICA DE CICLO COMBINADO	
<i>Eduardo Massashi Yamao</i>	
<i>Juliano Pierezan</i>	

João Paulo Silva Gonçalves
Marcos Cesar Gritti
Luís Gustavo Tomal Ribas
Flávio Chiesa
Victor Manuel Lopes dos Santos
Marcos de Freitas
André da Silva Orlandi
Leandro dos Santos Coelho

CAPÍTULO 8 82

CONFIRMAÇÃO DA EFICÁCIA DO ENSAIO DE RESPOSTA DO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA E BUCHAS CAPACITIVAS COMO TÉCNICA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

Hugo Rafael Freitas Negrão
Fernando de Souza Brasil
Bárbara Medeiros Campos
Maria Emília de Lima Tostes
Jorge Augusto Siqueira Tostes
Paulo Roberto Moutinho de Vilhena

CAPÍTULO 9 96

A EXPERIÊNCIA DA ELETRONORTE NA IMPLANTAÇÃO DA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA DIAGNÓSTICO DE REATORES E TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Vanessa de Cássia Viana Martins Beltrão

CAPÍTULO 10 113

ANÁLISE DE DESEMPENHO DA LINHA DE TRANSMISSÃO 230 KV DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE RONDÔNIA OPERANDO COM CABOS PARA-RAIOS ISOLADOS E ENERGIZADOS EM MÉDIA TENSÃO

José Ezequiel Ramos
Alexandre Piantini
Ary D'Ajuz
Valdemir Aparecido Pires
Paulo Roberto de Oliveira Borges

CAPÍTULO 11 126

ESTUDO DE APLICAÇÃO DO DISPOSITIVO SVC NA LINHA DE TRANSMISSÃO MESQUITA VIANA II

Alcebíades Rangel Bessa
Lucas Frizera Encarnação
Paulo José Mello Menegáz

CAPÍTULO 12 143

IMPLANTAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEA 230KV CIRCUITO DUPLO DA COPEL

Márcio Tonetti
Ilmar da Silva Moreira
João Nelson Hoffmann

CAPÍTULO 13 153

TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO: ESTUDO POR INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA E ACOPLAMENTO MAGNÉTICO RESSONANTE

Guilherme Hideki Shibukawa
Eric Eduardo Goveia Pandolfo
Ricardo Andreola
Emerson Charles Martins da Silva

CAPÍTULO 14 168

TARIFAS HORÁRIAS PARA SISTEMA DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO O SINAL LOCACIONAL

Marcio Andrey Roselli
André Meister

*Denis Perez Jannuzzi
Robson Kuhn Yatsu
André Veiga Gimenes
Miguel Edgar Morales Udaeta*

CAPÍTULO 15..... 178

AVALIAÇÃO DAS LÂMPADAS LED NO MERCADO BRASILEIRO (ARTIGO APRESENTADO NO XXIV SNPTEE)

*Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza
Maurício Barreto Lisboa
Willians Felipe de Oliveira Rosa*

CAPÍTULO 16..... 185

AVALIAÇÃO DO MÉTODO INDEPENDENTE DE MEDIÇÃO DE PERTURBAÇÕES RADIADAS – ANEXO B DA CISPR 15 (ARTIGO APRESENTADO NO XXIV SNPTEE)

*Alessandra da Costa Barbosa Pires de Souza
Maurício Barreto Lisboa
Willians Felipe de Oliveira Rosa*

CAPÍTULO 17 193

PADRÕES DE QUALIDADE PARA SERVIÇOS DE PINTURA ANTICORROSIVA APLICADOS AO SETOR ELÉTRICO

*Alberto Pires Ordine
Cristina da Costa Amorim
Marcos Martins de Sá
Elber Vidigal Bendinelli*

CAPÍTULO 18..... 209

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO, PRODUTIVIDADE E CUSTOS DE TECNOLOGIAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA PARA ESTRUTURAS ENTERRADAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

*Cristina da Costa Amorim
Alberto Pires Ordine
Marcos Martins de Sá
Wendell Porto de Oliveira*

CAPÍTULO 19 221

ANÁLISE DE QUASE-ACIDENTES, OCORRIDOS NA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO, COMO MEIO EFICAZ E PROATIVO NA PREVENÇÃO DE ACIDENTES

*Cristiano José Gober
Cresencio Silvio Segura Salas*

CAPÍTULO 20 235

PORTAL R3E COMO FERRAMENTA INDUTORA E DISSEMINADORA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

*Clara Ovídio de Medeiros Rodrigues
Marcelo Bezerra de Melo Tinoco
Aldomar Pedrini
Edison Alves Portela Junior
João Queiroz Krause
Marco Aurélio Ribeiro Gonçalves Moreira
Fernando Pinto Dias Perrone*

CAPÍTULO 21..... 246

HIERARQUIA DAS NECESSIDADES E RESILIÊNCIA NO PAGAMENTO DE SERVIÇOS PÚBLICOS UTILIZADOS: UM ESTUDO DE CASO VOLTADO A ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL

*Ana Lúcia Rodrigues da Silva
Fernando Amaral de Almeida Prado Jr.
Carolina Rodrigues de Almeida Prado*

CAPÍTULO 22 258

PROJETO PILOTO PARCELAMENTO PRÓ-ATIVO DE DÉBITOS DE IRREGULARIDADE

Diego Rivera Mendes

Julio Eloi Hofer

Rafael Luís de Avila

CAPÍTULO 23 267

MODELAGEM ESTRATÉGICA PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ANTECIPAÇÃO DO ATENDIMENTO AO CLIENTE PARA A MELHORIA OPERACIONAL E DE SERVIÇOS

Carlos Alberto Fróes Lima

Anderson Diego Machiaveli

Luciano E. A. Peres

Tales Neves Anarelli

SOBRE A ORGANIZADORA 287

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO, PRODUTIVIDADE E CUSTOS DE TECNOLOGIAS DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA PARA ESTRUTURAS ENTERRADAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Cristina da Costa Amorim

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Cepel,
Rio de Janeiro - RJ

Alberto Pires Ordine

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Cepel,
Rio de Janeiro - RJ

Marcos Martins de Sá

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Cepel,
Rio de Janeiro - RJ

Wendell Porto de Oliveira

FURNAS Centrais Elétricas, Rio de Janeiro - RJ

RESUMO: O aço galvanizado é bastante utilizado no setor elétrico por suas boas propriedades de proteção anticorrosiva. Esse material é, por exemplo, empregado em perfis de fundações de torres de linhas de transmissão que ficam em contato direto com o solo. O solo onde as fundações de torres de linhas de transmissão são construídas pode apresentar variadas condições de agressividade, acarretando processos corrosivos que demandam serviços de manutenção contínuos. Assim, o Cepel em conjunto com Furnas avaliou diferentes sistemas de proteção anticorrosiva para recuperação de estruturas enterradas, contemplando uma investigação de desempenho anticorrosivo, de produtividade e custos envolvidos nas tecnologias estudadas. O presente trabalho foi apresentado no XXIV SNPTEE - Seminário

Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica e recebeu o prêmio de 1º lugar no Grupo de Estudo de Aspectos Técnicos de Gerenciais de Manutenção – GMI 12.

PALAVRAS-CHAVE: Corrosão, Custo, Produtividade, Desempenho Anticorrosivo

ABSTRACT: Galvanized steel is widely used in the electrical sector for its good anticorrosion protection properties. This material is, for example, used in foundations of foundations of transmission lines towers which are in direct contact with the ground, that have many aggressive conditions, leading to corrosive processes that demand continuous maintenance services. Thus, Cepel and Furnas evaluated different corrosion protection systems for the recovery of buried structures, including an investigation of the anticorrosive performance, productivity and costs involved in the technologies studied. The present work was presented at the XXIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica and received the 1st prize in the Study Group on Technical Aspects of Maintenance Management - GMI 12.

KEYWORDS: Corrosion, Cost, Productivity, Anticorrosive Performance

1 | INTRODUÇÃO

As torres de linhas de transmissão, cujas fundações são constituídas de grelhas metálicas em aço galvanizado, podem apresentar intensos processos de corrosão na sua parte enterrada. Por este motivo, as equipes de manutenção das empresas Eletrobras realizam inspeções frequentes nestas torres, para programar e realizar serviços de recuperação nas fundações das mesmas. Essa atividade é de fundamental importância na preservação da integridade estrutural das torres.

Fatores como o teor de umidade, o pH, a presença de substâncias poluentes e de microrganismos são capazes de gerar diferentes condições de agressividade do solo. Além destas, condições específicas podem acelerar os processos corrosivos de estruturas metálicas em solo, como por exemplo, a presença de lençóis freáticos, condições de encharcamento periódico, regiões onde se usam fertilizantes e defensivos agrícolas e existência de diferentes condições de aeração do terreno em torno da estrutura (SERRA, 2006). Sobre esta última, um processo comum que se observa em fundações de torres de linhas de transmissão é a corrosão intensa na zona de afloramento.

Neste caso, um pouco abaixo da superfície do solo observa-se um processo de corrosão desencadeado pela menor disponibilidade de oxigênio em relação às zonas superficiais (SERRA, 2006), formando o mecanismo de corrosão conhecido como pilha de aeração diferencial (JONES, 1962). As regiões menos aeradas tornam-se anódicas, favorecendo a corrosão e as regiões mais aeradas da estrutura tornam-se catódicas, onde ocorre a redução do oxigênio presente no solo úmido que envolve a estrutura metálica. Quando as condições se tornam secas, este mecanismo tem velocidade reduzida.

Para evitar o mecanismo de corrosão por aeração diferencial nas zonas de afloramento de pés de torres de linhas de transmissão, é uma prática comum das equipes de manutenção das empresas Eletrobras recuperar os pés e realizar proteção anticorrosiva pelo uso de esquemas de pintura numa extensão que compreende aproximadamente 0,5 metros acima do nível do solo e 1,0 metro abaixo deste nível. Dessa forma, isola-se toda a região com possibilidades de apresentar pilhas de aeração diferencial, impedindo o contato da área com o meio corrosivo, evitando a corrosão da estrutura metálica. A tecnologia tradicionalmente utilizada neste serviço de recuperação compreende a limpeza de superfície por meio de ferramentas mecânicas ou de jateamento abrasivo seco ou úmido, seguido da aplicação de um sistema de pintura. O sistema pode ser constituído por uma tinta de fundo epóxi pigmentada com alumínio e por duas demãos de tinta com alcatrão de hulha.

Como o alcatrão de hulha é nocivo ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores, houve o desenvolvimento de uma tinta alternativa no mercado de tintas industriais, conhecida como tinta epóxi *tarfree* ou isenta de alcatrão de hulha. Tais esquemas de pintura são normatizados pela Eletrobras para os serviços de pintura anticorrosiva

(NORMAS ELETROBRAS DE PINTURA ANTICORROSIVA, NE-006, 2016).

Devido à importância do assunto para o setor elétrico, o Cepel em conjunto com Furnas realizou um estudo experimental para avaliar o desempenho anticorrosivo de alternativas tecnológicas ao esquema de pintura tradicionalmente utilizado na proteção de estruturas enterradas. Além da avaliação de desempenho, realizou-se uma avaliação de produtividade e custos dos esquemas de pintura aplicados, cujos resultados são apresentados neste artigo. Observou-se que o esquema com a tinta epóxi isenta de alcatrão de hulha foi uma boa alternativa ao esquema tradicional. Ressalta-se também que a análise de custos associada ao desempenho anticorrosivo foi uma informação útil na seleção de métodos de proteção anticorrosiva para estruturas enterradas.

2 | METODOLOGIA

Este estudo foi conduzido em solos, dispostos em caixas d'água de 250 L, previamente peneirados, para a remoção de detritos, em duas condições de agressividade diferentes, por um período total de 6,5 anos. Os solos foram caracterizados e mantidos em constante condição úmida durante todo o ensaio, sendo que uma das condições apresentava o solo natural e a outra, o solo mais agressivo. O solo agressivo foi obtido através da adição de cloreto de sódio em concentração de 3,5%, para acelerar os eventuais processos corrosivos. Corpos de prova foram preparados e enterrados, para avaliar o desempenho anticorrosivo das diferentes tecnologias investigadas.

Como substratos foram utilizados perfis metálicos de torres com 7 mm de espessura, fornecidos por Furnas, e que estavam enterrados há vários anos, em avançado estágio de corrosão. Tais perfis foram cortados em chapas de 100 mm x 300 mm e recuperados por dois processos de limpeza diferentes, o tratamento com ferramentas mecânicas e o jateamento abrasivo úmido. No primeiro caso, obteve-se um padrão de limpeza de superfície St 3, já no segundo, um padrão equivalente a Sa 3, ambos em conformidade com a norma ISO 8501-1/Part 1 (2007). O jateamento abrasivo gerou um perfil de rugosidade médio de 50 μm e a superfície apresentou um grau leve de oxidação instantânea anteriormente à pintura. Além do esquema de pintura tradicional (tinta epóxi pigmentada com alumínio e tinta epóxi alcatrão de hulha), aplicou-se um esquema substituindo a tinta epóxi alcatrão de hulha por aquela isenta de alcatrão de hulha.

Além desses esquemas, foram investigados esquemas de pintura contendo uma tinta de fundo rica em zinco, com o objetivo de avaliar o quanto este tipo de esquema pode ser comparável a uma galvanização convencional, em termos de proteção anticorrosiva.

A Tabela 1 apresenta os esquemas de pintura estudados e como foram referenciados no estudo.

Esquema	Tratamento de superfície	Tinta de fundo	Tinta intermediária / de acabamento
E1	Jateamento abrasivo	Epóxi pigmentada com alumínio, conforme NE-022 (5), 130 mm	Epóxi com alcatrão de hulha, conforme NE-012 (6), 280 mm
E1st	Ferramentas mecânicas		
E2	Jateamento abrasivo	Monocomponente e de cura por evaporação de solventes, com teor de zinco metálico na película seca de 93%, 60 mm	Poliuretano de cura com umidade do ar, contendo óxido de ferro micáceo, 120 mm
E2st	Ferramentas mecânicas		
E3	Jateamento abrasivo		Idem à tinta de fundo, 60 mm
E3st	Ferramentas mecânicas		
E4	Jateamento abrasivo	Epóxi pigmentada com alumínio, conforme NE-022 (5), 130 mm	Epóxi com alto teor de sólidos, isenta de alcatrão de hulha, 280 mm

Tabela 1 – Esquemas de pintura, sua denominação e características técnicas

Foram realizados ensaios de aderência por resistência à tração, conforme a norma ASTM D4541 (2009), antes e após o ensaio de desempenho anticorrosivo nos solos. Além disso, como critérios de desempenho, avaliaram-se os corpos de prova após o ensaio, quanto aos graus de empoamento e corrosão (ISO 4628, 2011). Para se obter um parâmetro capaz de mensurar a proteção anticorrosiva em cada ensaio realizado, elaborou-se uma metodologia de classificação de desempenho dos diferentes esquemas de pintura, com base em um sistema de pontuação. Em cada ensaio atribuiu-se pontos aos esquemas de pintura, conforme seu desempenho.

Na Tabela 2, são descritos o sistema de pontos e sua interpretação. Como cada ensaio tem parâmetros diferentes para avaliação dos esquemas, a utilização deste sistema de pontuação foi uma forma de padronizar a classificação de desempenho entre os diferentes esquemas de pintura.

Pontos	Interpretação
0	O esquema de pintura não atendeu o desempenho esperado
1	O esquema de pintura atendeu parcialmente o desempenho esperado
2	O esquema de pintura atendeu integralmente o desempenho esperado

Tabela 2 – Pontuação de desempenho de esquemas de pintura em ensaios

A produtividade de aplicação dos esquemas de pintura foi avaliada com base no levantamento dos tempos gastos nas operações técnicas realizadas para concluir a proteção anticorrosiva em cada caso. Tais operações compreendem as seguintes etapas: tratamento de superfície; homogeneização prévia dos componentes das tintas, pesagem e mistura dos mesmos; aplicação das tintas; limpeza dos materiais

utilizados. Com exceção da primeira etapa, as demais se repetem a cada demão de tinta, conseqüentemente, os esquemas com menor número de demãos são aqueles com maior produtividade e vice-versa.

Os corpos de prova possuíam área total de 0,06 m², uma vez que os dois lados foram pintados. Observou-se que a etapa de limpeza de material consumiu o mesmo tempo, em torno de 30 minutos, independentemente do esquema aplicado. Assim, esta etapa foi uma parcela de igual contribuição para todas as demãos de tinta e incluída na etapa de aplicação das tintas. Além disso, para fins de simplificação, as etapas de homogeneização e pesagem e mistura dos componentes das tintas constituintes do esquema de pintura foram agrupadas em uma única etapa denominada “preparação das tintas”.

Dessa forma, o gasto de tempo total (GT) de cada esquema de pintura foi calculado pela equação [1].

$$GT = GTS + GPE + GAE \text{ [1]}$$

Onde: GT é o gasto total de tempo para aplicar o esquema de pintura, em h/m²;

GTS é o gasto de tempo na etapa de tratamento de superfície, em h/m²;

GPE é o gasto de tempo na etapa de preparação das tintas, em h/m²;

GAE é o gasto de tempo na etapa de aplicação do esquema de pintura, em h/m².

Os custos das tintas foram levantados junto aos respectivos fabricantes e, para fins de padronização, foram considerados sem a incidência de impostos. Neste trabalho, os resultados apresentados estão baseados nos custos relativos ao esquema tradicionalmente utilizado.

A partir da avaliação de desempenho anticorrosivo, de produtividade e custo dos esquemas de pintura, com as metodologias apresentadas foi possível selecionar mais adequadamente os esquemas de pintura para manutenção de estruturas enterradas de torres de linhas de transmissão.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação de Desempenho

O solo empregado no estudo apresentava características argilosas, nas duas condições de agressividade investigadas. A Tabela 3 apresenta os resultados da análise química dos extratos aquosos dos solos em que os corpos de prova foram enterrados, evidenciando-se que a condição agressiva apresentava um elevado teor de sais de cloreto.

Tipo de solo	pH	Condutividade (mS/cm)	Teor de cloreto (mg/kg)	Teor de sulfato (mg/kg)
Natural úmido	7,3	112	1	2
Agressivo úmido	6,9	9902	3305	11

Tabela 3 – Análise química de extratos aquosos dos solos utilizados durante os ensaios de corrosão.

O valor mais acentuado da condutividade no solo agressivo úmido está relacionado ao alto teor de cloreto presente. Além de acelerar a corrosão metálica, este torna o meio mais condutor, facilitando os processos eletroquímicos da corrosão (GENTIL, 2003). Entre os esquemas de pintura estudados, após 6,5 anos enterrados nos dois tipos de solo, verificou-se que E1, E2 e E4, independentemente do tratamento de superfície e da condição de solo, apresentaram-se visualmente íntegros ao final dos ensaios, sem descascamento e corrosão. No caso do esquema E3, observou-se um desgaste considerável da película de tinta e áreas com corrosão do substrato devido à perda de aderência do revestimento. Esse processo de degradação foi mais intenso no caso do solo agressivo e com tratamento de superfície por ferramentas mecânicas.

A Tabela 4 apresenta o desempenho dos corpos de prova nos ensaios em solo, em termos de área de corrosão, classificada conforme os padrões da Norma SSPC-VIS 2 (2000), em que o tipo de corrosão foi generalizada (G). Nesta Norma, a classificação utiliza números inteiros em sequencia, desde 1 a 9, sendo 1 aquelas superfícies com área mais corroída (50% ou mais) e 9, aquelas com área menos corroída (0,03%). Somente são apresentados os esquemas que tiveram corrosão.

Como resultados obtidos, ficou evidente que a tinta utilizada para o esquema E3 não atendeu à condição enterrada para substratos que já perderam a camada de galvanização e foram recuperados em serviços de manutenção. É um equívoco afirmar que a tinta rica em zinco, como um único constituinte de um esquema de pintura, é capaz de recuperar a galvanização da peça. Estudos já realizados mostram que estruturas em aço galvanizado por imersão a quente, com peso de camada de 900 g de Zn/m² (espessura de 125 mm), enterradas em solos agressivos proporcionam uma proteção adequada de 15 anos ou mais (SERRA, 2006). Com menos da metade deste tempo, na condição de solo agressivo, os corpos de prova com o esquema E3 apresentaram uma extensão considerável de área corroída e a tinta mostrou-se bem degradada.

Tipo de solo	Esquema	Classificação de corrosão (10)	
		Grau de corrosão	Àrea corroída (%)
Natural úmido	E3	7-G	0,3
	E3st	7-G	0,3
Agressivo úmido	E3	2-G	33,0
	E3st	1-G	50,0

Tabela 4 – Resultados do grau de corrosão dos corpos de prova ensaiados em solo, após 6,5 anos.

A Tabela 5 apresenta os resultados de aderência antes e após os ensaios nas duas condições de solo.

Esquema de pintura	Aderência inicial		Solo Natural Úmido		Solo Agressivo Úmido	
	Tensão de Ruptura (MPa)	Natureza da Falha	Tensão de Ruptura (MPa)	Natureza da Falha	Tensão de Ruptura (MPa)	Natureza da Falha
E1	19,3	C/Y	15,3	40% B; 60% C/Y	17,6	25% B; 75% C/Y
E1st	13,7	40% B; 60% C/Y	14,7	60% B; 40% C/Y	19,1	75% B; 25% C/Y
E2	11,1	C	8,4	80% C; 20% B	8,1	C
E2st	8,0	C	7,7	80% C; 20% B	4,5	C
E3	10,8	A/B	14,6	B	Não foi possível medir	
E3st	13,5	A/B	11,0	A/B	Não foi possível medir	
E4	9,2	C	14,6	50% C/Y; 50% B (*)	17,4	60% C/Y; 40% B (*)

Tabela 5 – Resultados de aderência por resistência à tração antes e após os ensaios em solos.

(*) Presença de pontos de corrosão na superfície.

Os resultados mostram que os esquemas de pintura E1, E2 e E4 tiveram boa aderência ao substrato, tanto sobre superfície tratada com jateamento abrasivo, quanto por meio de ferramentas mecânicas. Quanto ao esquema E3, os valores e, principalmente, a natureza da falha obtida na região do arrancamento dos carretéis, correspondem ao pior desempenho anticorrosivo observado. De fato, o que é menos desejado numa avaliação de ensaio de aderência por tração é a falha entre o substrato e o revestimento (adesiva A/B).

Com base em todos os resultados apresentados da avaliação de desempenho dos diferentes esquemas de pintura investigados, elaborou-se a Tabela 6, contendo a pontuação para classificar o desempenho.

Ensaio E1		Esquema de pintura						
		E1st	E2	E2st	E3	E3st	E4	
Aderência inicial		2	2	2	2	0	0	2
Natural úmido	Grau de corrosão	2	2	2	2	1	1	2
	Aderência final	2	2	2	2	2	0	2
Agressivo úmido	Grau de corrosão	2	2	2	2	0	0	2
	Aderência final	2	2	2	2	0	0	2
Total de pontos		10	10	10	10	3	1	10
Avaliação relativa de desempenho (%)		100	100	100	100	30	10	100

Tabela 6 – Pontuação de desempenho para os esquemas de pintura por ensaio.

3.2 Avaliação de Produtividade

Com base nas observações experimentais, as parcelas e o resultado da equação [1] foram estimados para cada esquema de pintura e os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tempo gasto (h/m ²)	Esquema de pintura						
	E1	E1st	E2	E2st	E3	E3st	E4
Tratamento de superfície (GTS)	0,55	2,78	0,55	2,78	0,55	2,78	0,55
Preparação das tintas (GPE)	1,70	1,70	0,55	0,55	0,37	0,37	1,70
Aplicação das tintas (GAE)	3,40	3,40	3,64	3,64	2,22	2,22	3,40
Tempo total gasto para o esquema (GT)	5,65	7,88	4,74	6,97	3,14	5,37	5,65
Avaliação relativa de produtividade (%)	55,6	39,8	66,2	45,1	100,0	58,5	55,6

Tabela 7 – Produtividade dos esquemas de pintura.

O tratamento de superfície por ferramentas mecânicas é cerca de 5 vezes mais demorado do que aquele por jateamento abrasivo. Na etapa de preparação de tintas, o tempo gasto depende da quantidade de demãos do esquema de pintura e se a tinta é bicomponente ou monocomponente. Como as tintas dos esquemas E2 e E3 são monocomponentes, toma-se menos tempo para prepará-las. No caso do esquema E3, em especial, aplicou-se 2 demãos, reduzindo ainda mais esta etapa. Todos os demais esquemas foram aplicados em 3 demãos (uma de tinta de fundo e duas de acabamento).

Já na etapa de aplicação das tintas, o tempo depende sobretudo da quantidade de demãos, porém no caso dos esquemas E2 e E3, foi necessário realizar o procedimento chamado de *mist coat*, que torna a aplicação do esquema mais lenta. O *mist coat* é feito em tintas muito porosas, geralmente as pigmentadas com zinco, e consiste em pulverizar uma demão bem fina da tinta da demão subsequente, com o objetivo

de selar a superfície da tinta de fundo. Após curto tempo de secagem, aplica-se a demão seguinte na espessura especificada. Este procedimento é um recurso para evitar formação de pequenas bolhas na segunda demão, durante a sua secagem, tipicamente observado quando se emprega uma tinta impermeável sobre uma tinta porosa (como é o caso das tintas pigmentadas com zinco). O *mist coat* aumentou o tempo de aplicação de uma demão do esquema de pintura em 50%.

A Tabela 7 também apresenta o resultado de produtividade relativa, tomando-se por base que o máximo de produtividade possível foi com o esquema E3 (100%), que registrou o menor gasto de tempo. Em relação a este esquema, calculou-se a produtividade dos demais, percentualmente.

3.3 Avaliação de Custo

A avaliação de custo dos esquemas de pintura contemplou o custo dos tratamentos de superfície somados aos custos das diferentes tintas utilizadas. Para o custo dos tratamentos de superfície, consultou-se uma empresa que presta serviços de pintura anticorrosiva para o setor elétrico, solicitando-se a diferença de custo entre a preparação de superfície até o grau de limpeza Sa 3, em comparação àquela com grau St 3. A empresa informou que a obtenção do grau de limpeza no último caso tem um custo superior ao primeiro, visto que tem maior dificuldade. Para o Sa 3, o custo varia de 35 a 40 R\$/m², e para o St 3, de 45 a 50 R\$/m². Para contabilização neste trabalho, utilizaram-se as médias, dentro destes intervalos, ou seja, R\$ 37,50/m² para obtenção do grau de limpeza Sa 3 e R\$ 47,50/m² para obtenção do grau de limpeza St 3.

Os custos das tintas (R\$/m²) foram calculados com base em dados fornecidos pelos respectivos fabricantes (R\$/L) e no rendimento das tintas (m²/L), a partir de seus boletins técnicos. Os preços das tintas foram aqueles isentos de impostos e informados no período de setembro a dezembro de 2016. Com os custos das tintas, foi possível obter os custos dos esquemas de pintura, que somados àqueles devido aos métodos de preparação de superfície, resultou na avaliação de custo deste estudo. Os valores foram convertidos em percentuais relativos ao esquema de custo máximo (100%), que se refere ao esquema E3st. A Tabela 8 apresenta os resultados.

Custo do esquema de pintura (R\$/m ²)	Esquema de pintura						
	E1	E1st	E2	E2st	E3	E3st	E4
Preparação de superfície	37,50	47,50	37,50	47,50	37,50	47,50	37,50
Custo do sistema de pintura	15,64	15,64	58,53	58,53	59,79	59,79	16,48
Custo total	53,14	63,14	96,03	106,03	97,29	107,29	53,98
Avaliação relativa de custo (%)	49,50	58,90	89,50	98,80	90,70	100,00	50,30

Tabela 8 – Custos dos esquemas de pintura.

Observou-se que o sistema E3 apresentou maior custo total, devido ao maior custo da tinta de fundo, que tem também um baixo rendimento, levando a um aumento relativo do custo por área. Mesmo este esquema sendo de duas demãos, em comparação ao E2, com três demãos. Os esquemas E2 e E3 são os mais onerosos, com tinta de fundo rica em zinco, em comparação aos esquemas do tipo barreira (E1 e E4). É interessante notar também que o uso da tinta com tecnologia isenta de alcatrão de hulha (E4) não é muito mais custosa que ao sistema tradicional com tinta epóxi alcatrão de hulha.

3.4 Avaliação de Desempenho, Produtividade e Custo

A Figura 1 apresenta os resultados relativos (%) dos parâmetros avaliados nos itens anteriores, a partir da qual foi possível realizar uma análise entre o desempenho anticorrosivo, a produtividade e o custo, comparando-se os diferentes esquemas de pintura investigados.

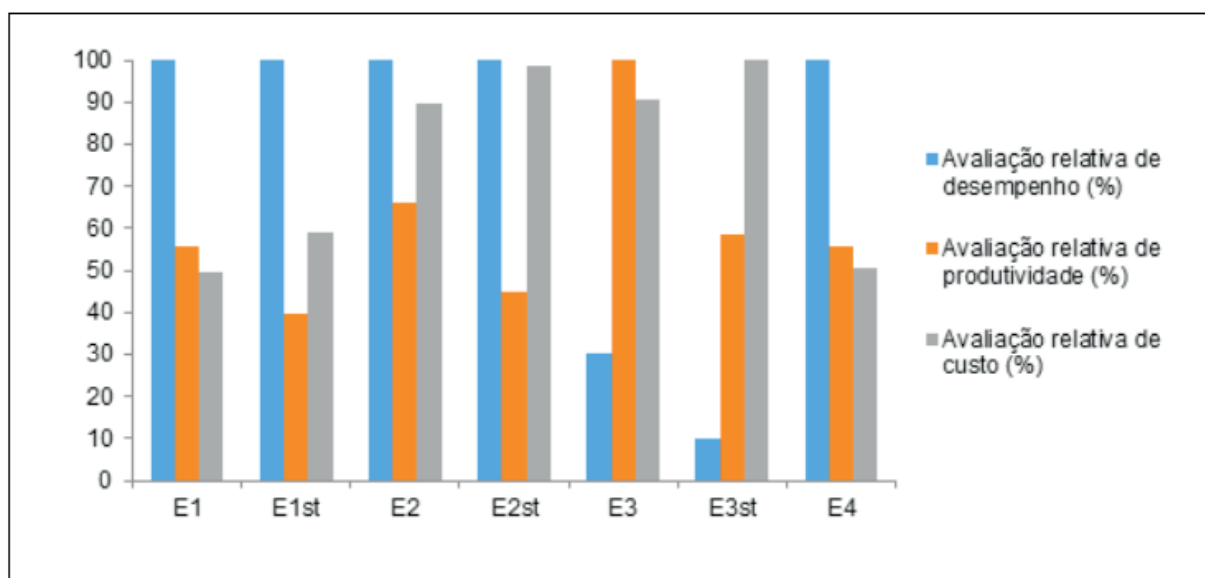


Figura 1 – Avaliação de Desempenho, Produtividade e Custo

Como pode ser observado, tomando-se como referência o esquema E1, aplicado tanto sobre o substrato tratado com jateamento abrasivo quanto por meio de ferramentas mecânicas, foi possível verificar que o esquema E4 mostrou comportamento semelhante, tanto em termos de desempenho anticorrosivo, quanto em produtividade e custo.

A influência do tipo de preparação de superfície também ficou evidenciada ao se comparar os esquemas E1 e E1st e E2 e E2st. O método utilizando ferramentas mecânicas é menos produtivo do que o jateamento abrasivo, uma vez que depende em grande parte do operador da ferramenta. Esta velocidade reduzida de processo, além de aumentar o tempo de serviço, e conseqüentemente, diminuir a produtividade, acarreta um aumento no custo em função do tempo e do valor do gasto com o HH do

operador.

Com relação aos esquemas contendo tinta de fundo rica em zinco, observa-se que o E2 apresentou bom desempenho, próximo com o do esquema de referência. Entretanto, seu custo foi muito elevado, tornando-o uma opção inadequada. Aqui, também se observa a diferença de produtividade relacionada aos métodos de preparo de superfície. Já o esquema E3 falhou em dois dos três requisitos de avaliação, mostrando-se inadequado para o caso de revestimento de estruturas enterradas, principalmente nos quesitos desempenho anticorrosivo e custo.

Ao se analisar a diferença de desempenho apresentada pelos esquemas E2 e E3, que possuíam a mesma tinta de fundo, verifica-se que a demão da tinta de acabamento aplicada, por ser mais impermeável, proporcionou uma proteção adicional ao substrato.

4 | CONCLUSÃO

Os esquemas de referência (E1 e E1st) e o sistema E4 foram aqueles que apresentaram os melhores desempenhos em todos os ensaios realizados. O sistema E4 teve um bom desempenho, com a vantagem de sua tinta de acabamento ser isenta de alcatrão de hulha, portanto é um ganho ecológico em relação à tinta de acabamento do esquema E1. Como se sabe, o alcatrão de hulha está sendo substituído devido a sua toxicidade e problemas de contaminação para o meio ambiente. Assim, o sistema E4 é uma boa alternativa ao sistema E1 na manutenção de estruturas enterradas, para uma variada condição de agressividade do solo, uma vez que se mostrou equivalente em termos, não somente de desempenho anticorrosivo, como também de custo e produtividade.

O esquema E2 mostrou bom desempenho anticorrosivo, razoável produtividade, porém seu custo foi elevado.

O esquema E3 mostrou-se inadequado às condições de ensaio, em função do baixo desempenho anticorrosivo e elevado custo.

REFERÊNCIAS

ASTM INTERNATIONAL, ASTM D4541, **Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers**, 2009.

GENTIL, V. **Corrosão**, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 4628, **Paints and varnishes - Evaluation of degradation of coatings - Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance**, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO 8501-1, **Preparation of steel**

substrates before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness - Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings, 2007.

JONES, D. A. **Principles and prevention of corrosion**, Macmillan Publishing Company, 1992.

NORMAS ELETROBRAS DE PINTURA ANTICORROSIVA, **NE-006, Pintura de aço galvanizado**, 2016.

NORMAS ELETROBRAS DE PINTURA ANTICORROSIVA, **NE-012, Tinta epóxi alcatrão de hulha, curada com poliamida**, 2016.

NORMAS ELETROBRAS DE PINTURA ANTICORROSIVA, **NE-022, Tinta de fundo epóxi pigmentada com alumínio, curada com poliamina**, 2016.

SERRA, E. T. **Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo**, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Cepel, 2006.

SSPC THE SOCIETY FOR PROTECTIVE COATINGS, SSPC-VIS 2, **Standard method of evaluating degree of rusting on painted steel surfaces**, 2000.

SOBRE A ORGANIZADORA

Jaqueline Oliveira Rezende Possui graduação em Engenharia Elétrica, com certificado de estudos em Engenharia de Sistemas de Energia Elétrica e mestrado em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica, no Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela Universidade Federal de Uberlândia. Atuou como professora nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação. Tem realizado pesquisas em Sistemas de Energia Elétrica, dedicando-se principalmente às seguintes áreas: Energia Solar Fotovoltaica; Curvas Características de Painéis Fotovoltaicos; Dinâmica de Sistemas Elétricos; Geração Distribuída; Simulação Computacional; Algoritmo Genético.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-85107-46-8

