

# A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Elétrica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)



# A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Elétrica

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)



2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação:** Karine de Lima

**Edição de Arte:** Lorena Prestes

**Revisão:** Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

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

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá  
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima  
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie di Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia  
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná

Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília  
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília  
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás  
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Msc. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza  
Prof. Dr. Adailson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Profª Msc. Bianca Camargo Martins – UniCesumar  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Msc. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Profª Msc. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil  
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
Prof. Msc. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária  
Prof. Msc. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná  
Prof<sup>a</sup> Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>a</sup> Msc. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará  
Prof<sup>a</sup> Msc. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Msc. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof. Msc. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Msc. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof<sup>a</sup> Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof<sup>a</sup> Msc. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

A642 A aplicação do conhecimento científico na engenharia elétrica  
[recurso eletrônico] / Organizadores João Dallamuta, Henrique  
Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2020.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-932-5

DOI 10.22533/at.ed.325201701

1. Engenharia elétrica – Pesquisa – Brasil. I. Dallamuta, João.  
II. Holzmann, Henrique Ajuz.

CDD 623.3

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

Atena Editora  
Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricitista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é portando pesquisar em uma gama enorme de áreas, subáreas e abordagens de uma engenharia que é onipresente em praticamente todos os campos da ciência e tecnologia.

Neste livro temos uma diversidade de temas, níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
PANORAMA ATUAL E CENÁRIO 2025 DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL	
Isabela Valpecovski Urbanetz Allana de Moura Netto Bruno Scolari Vicente Leite Jair Urbanetz Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017011</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
GESTÃO EFICIENTE DAS ANUIDADES REGULATÓRIAS NA CEMIG DISTRIBUIÇÃO	
Rosane de Pinho Matos Viviane Fernanda de Aguiar Pereira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017012</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>21</b>
DESAFIOS DA REVISÃO PERIÓDICA DE AJUSTES DE GRANDES SISTEMAS -NORMAS, PROCEDIMENTOS E FERRAMENTAS	
Rodrigo A. Benes Ferreira Mario Roberto Bastos Nilson José Francischetti Júnior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017013</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>36</b>
AVALIAÇÃO ECONÔMICA E ENERGÉTICA DE UM SISTEMA INTEGRANDO MÁQUINA BIOPEIXES E REATOR MULTIFUNCIONAL PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	
Francisco de Assis da Silva Mota Francisco Francielle Pinheiro dos Santos Paula Cristina de Amorim Andrade	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017014</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>48</b>
ANÁLISE DE PERDAS TÉCNICAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	
Francisco Jeandson Rodrigues da Silva Ailson Pereira de Moura Adriano Aron Freitas de Moura Douglas Aurélio Carvalho Costa Obed Leite Vieira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017015</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>61</b>
CARACTERIZAÇÃO E ESTRATIFICAÇÃO DOS SFVCR NO BRASIL: CENÁRIO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS	
Diego Piazza Hilgert Jair Urbanetz Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017016</b>	

<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>75</b>
GECORTE CEMIG D: SELEÇÃO ÓTIMA DE ALVOS DE CORTE USANDO GEORREFERENCIAMENTO: DESENVOLVIMENTO SAP/CCS	
Wellington Fazzi Cancian Andre Luiz Soares Charles Ramos Pimenta	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017017</b>	
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>89</b>
ÍNDICES DE REFERÊNCIA PARA APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA CABOS PARA-RAIOS ENERGIZADOS	
José Ezequiel Ramos Alexandre Piantini Ary D'Ajuz Valdemir Aparecido Pires Paulo Roberto de Oliveira Borges	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017018</b>	
<b>CAPÍTULO 9 .....</b>	<b>96</b>
A EXPERIÊNCIA DA COPEL COM RELIGADORES MONOFÁSICOS	
Maurício Varassim Hernandes Oscar Kim Júnior Fausto Aurélio Portella Garcia Guilherme Fernandes Gonçalves	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3252017019</b>	
<b>CAPÍTULO 10 .....</b>	<b>108</b>
SISTEMA DE MONITORAMENTO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA COM VISTAS A MELHORIA DA QUALIDADE DE SERVIÇO	
Klendson Marques Canuto Avilez Batista de Oliveira Lima Paulo Roberto de Oliveira Braga Juraci Gomes de Aguiar Filho André Ribeiro da Costa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170110</b>	
<b>CAPÍTULO 11 .....</b>	<b>122</b>
TÉCNICA DE RESGATE PARA TRABALHOS EM INSTALAÇÕES ENERGIZADAS – MÉTODO AO POTENCIAL	
Fernando César Pepe Wlademir Braido	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170111</b>	
<b>CAPÍTULO 12 .....</b>	<b>128</b>
MONITORAMENTO DE DESGASTE DE CONTATOS DOS DISJUNTORES DA SUBESTAÇÃO ISOLADA À GÁS DA UHE BELO MONTE	
Davi Carvalho Moreira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170112</b>	



**CAPÍTULO 13 ..... 139**

COMPARAÇÃO ENTRE TRANSFORMADORES A ÓLEO E A SECO

Marco Antonio Ferreira Finocchio  
Márcio Mendonça  
Lucas de Oliveira Antunes  
Jeferson Gonçalves Ferreira

**DOI 10.22533/at.ed.32520170113**

**CAPÍTULO 14 ..... 147**

OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS APLICADA A CONTROLADORES DE CORRENTE PARA INVERSORES CONECTADOS À REDE

Lucas Cielo Borin  
Iury Cleveston  
Caio Ruviaro Dantas Osorio  
Gustavo Guilherme Koch  
Fabricio Moretto Bottega  
Vinicius Foletto Montagner

**DOI 10.22533/at.ed.32520170114**

**CAPÍTULO 15 ..... 161**

OTIMIZAÇÃO DA CONFIABILIDADE PELA ALOCAÇÃO DE CHAVES AUTOMÁTICAS E USO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM ILHAMENTO

Railson Severiano de Sousa  
Camilo Alberto Sepúlveda Rangel  
Criciéle Castro Martins  
Mauricio Sperandio  
Luciane Neves Canha

**DOI 10.22533/at.ed.32520170115**

**CAPÍTULO 16 ..... 175**

COMO SELECIONAR TRANSISTORES DE POTÊNCIA PARA APLICAÇÕES EM CONVERSORES ESTÁTICOS?

Edemar de Oliveira Prado  
Pedro Cerutti Bolsi  
Mateus José Tiburski  
Éder Bridi  
Hamiltom Confortin Sartori  
José Renes Pinheiro

**DOI 10.22533/at.ed.32520170116**

**CAPÍTULO 17 ..... 190**

METODOLOGIA DE PROJETO DE CONVERSORES BOOST PARA APLICAÇÕES DE ALTA EFICIÊNCIA E ELEVADO GANHO DE TENSÃO

Mateus José Tiburski  
Éder Bridi  
Edemar Oliveira Prado  
Pedro Cerutti Bolsi  
Hamiltom Confortin Sartori  
José Renes Pinheiro

**DOI 10.22533/at.ed.32520170117**

<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>203</b>
INFLUÊNCIA DO PONTO DE OPERAÇÃO DE CONVERSORES ESTÁTICOS NO VOLUME E PERDAS DE DIFERENTES MATERIAIS MAGNÉTICOS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Pedro Cerutti Bolsi</li> <li>Edemar de Oliveira Prado</li> <li>Mateus José Tiburski</li> <li>Éder Bridi</li> <li>Hamiltom Confortin Sartori</li> <li>José Renes Pinheiro</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170118</b>	
<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>218</b>
WIRELESS CHARGER MANUFACTURING USING INDUCTIVE METHOD	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Maryam Liaqat</li> <li>Sulman Joseph</li> <li>Shamsa Maqsood</li> <li>Ali Raza</li> <li>Sana Aslam</li> <li>Waseem Imtiaz</li> <li>Muhammad Furqan Shoukat</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170119</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>235</b>
TRANSFORMADOR DE ATERRAMENTO EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Djair Pamplona dos Santos</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170120</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>248</b>
OTIMIZAÇÃO DE CONVERSORES BOOST INTERCALADO DE ALTO GANHO DE TENSÃO E ALTA EFICIÊNCIA	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Éder Bridi</li> <li>Mateus José Tiburski</li> <li>Edemar Oliveira Prado</li> <li>Pedro Cerutti Bolsi</li> <li>Hamiltom Confortin Sartori</li> <li>José Renes Pinheiro</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170121</b>	
<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>262</b>
DETERMINAÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA AVALIAR A INCERTEZA NA PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO E VAZÃO AFLUENTE POR SISTEMAS HIDRO METEOROLÓGICOS PARA AUXÍLIO NA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS E PLANEJAMENTO HIDROENERGÉTICO	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Reinaldo Bomfim da Silveira</li> <li>Anderson Nascimento de Araujo</li> <li>Mino Viana Sorribas</li> <li>Camila Freitas</li> <li>Rafael Schinoff Mércio Pereira</li> <li>Ângelo Breda</li> <li>José Eduardo Gonçalves</li> </ul>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32520170122</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>276</b>



## MONITORAMENTO DE DESGASTE DE CONTATOS DOS DISJUNTORES DA SUBESTAÇÃO ISOLADA À GÁS DA UHE BELO MONTE

Data de aceite: 03/01/2020

**Davi Carvalho Moreira**

Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A  
Tucuruí-Brasil

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2413664649532144>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-3285>

Data de submissão: 04/11/2019

**RESUMO:** Este artigo tem como objetivo apresentar o sistema de monitoramento on-line de desgaste dos contatos dos disjuntores instalados na subestação isolada a gás (SIG) da Usina Hidrelétrica de Belo Monte (UHE Belo Monte). Este monitoramento é baseado no critério de corrente interrompida acumulada que utiliza o número de operações, tempo de operação e corrente de interrupção do disjuntor para o cálculo do “Indicador de Desgaste” que é o principal direcionador para intervenção nos contatos do disjuntor. O sistema de monitoramento de desgaste dos contatos nos disjuntores da SIG 500kV da UHE Belo Monte, se mostrou um método prático, replicável em disjuntores de outras instalações e sua eficiência está sendo acompanhada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Manutenção Preditiva – Monitoramento de Disjuntor – Desgaste de Contatos – Monitoramento On-line.

**ABSTRACT:** This paper aims to present the on-line monitoring system for contact breaker contacts installed in the gas insulated substation (GIS) of Belo Monte Hydroelectric Power Plant (Belo Monte Hydroelectric Power Plant). This monitoring is based on the accumulated interrupted current criterion that uses the number of operations, operating time, and breaker interrupt current to calculate the “Wear Indicator” which is the main driver for intervention on the breaker contacts. The contact wear monitoring system on the Belo Monte HPP SIG 500kV circuit breakers has proved to be a practical method, replicable on circuit breakers in other installations and its efficiency is being monitored.

**KEYWORDS:** Predictive Maintenance - Circuit Breaker Monitoring - Contact Wear - Online Monitoring.

### 1 | INTRODUÇÃO

Os disjuntores são equipamentos essenciais no sistema elétrico de potência. Eles são usados para alterar a topologia do sistema para acomodar várias configurações de fluxo da carga e também são usados para isolar partes defeituosas do sistema elétrico de potência, como parte da operação do relé de proteção [1]. À medida que os disjuntores operam durante

sua vida útil, eles sofrem severas tensões elétricas, mecânicas e térmicas que podem degradar suas condições operacionais. Dessa forma, as condições de operação dos disjuntores necessitam ser continuamente observadas [2].

Os métodos de monitoramento das condições dos disjuntores são classificados como off-line, on-line e em tempo real. Em técnicas off-line, as medições podem ser obtidas de equipamentos desenergizados. Em métodos on-line, as medições podem ser capturadas a partir de aparatos energizados sempre que necessário, enquanto que em procedimentos em tempo real, as medições precisam ser tomadas continuamente usando amostragem em tempo real [3,4].

A importância da Usina Hidrelétrica de Belo Monte (UHE Belo Monte) para o setor elétrico brasileiro justifica a concepção de projeto do sistema de monitoramento dos disjuntores de alta tensão, seguir a tendência geral dos equipamentos de potência, de migração da manutenção preventiva para a manutenção preditiva, o que só foi possível através de sistemas de monitoramento on-line.

Até o final de 2018, a Subestação Isolada a Gás (SIG) da UHE Belo Monte possuía em operação 20 (vinte) disjuntores 500kV em operação e outros 10 (dez) em montagem e comissionamento. Esta SIG foi concebida em barra dupla com 18 (dezoito) vãos ligação de transformador, 5 (cinco) vãos de saída de linha, 2 (dois) vãos de interligação de barras e 2 (dois) vãos de seccionamento de barra, conforme mostrado na Figura 1.

Durante muito tempo, a integridade dos equipamentos nas subestações e usinas dependia da manutenção preventiva. Atualmente as empresas de energia e as indústrias convivem com reduzidas equipes de engenharia de manutenção, e torna-se necessário o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem no processo de tomada de decisão para uma precisa intervenção [5]. É nesse contexto que este artigo apresenta o sistema de monitoramento on-line de desgaste dos contatos dos disjuntores instalados na SIG da UHE Belo Monte.

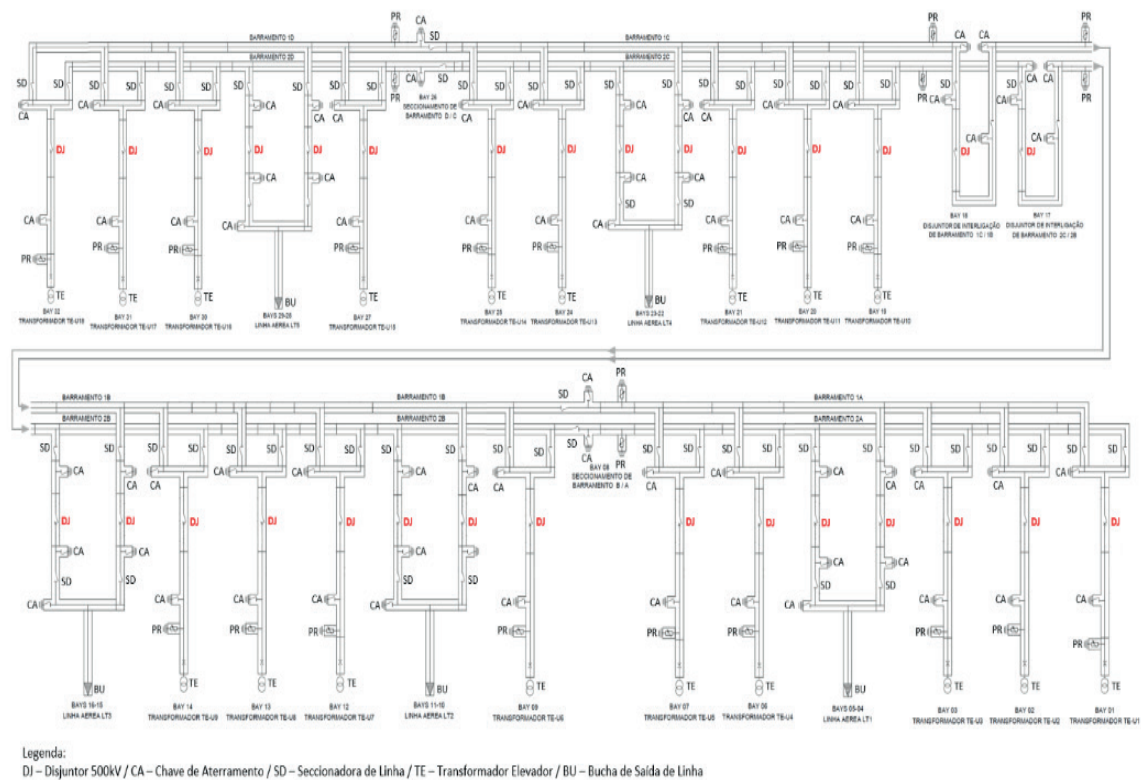


Figura 1 – Diagrama Unifilar da Subestação Isolada a Gás da UHE Belo Monte.

## 2 | ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO EM DISJUNTOR

Para manter o disjuntor em condições normais de operação, a manutenção adequada é muito importante durante sua vida útil. As estratégias de manutenção podem ser classificadas em manutenção corretiva e manutenção preventiva [6–8]. A manutenção corretiva ocorre após a falha no equipamento, e a manutenção preventiva é realizada antes da falha no equipamento. A estratégia de manutenção preventiva contribui para minimizar os custos de manutenção e o tempo de indisponibilidade do equipamento, e inclui principalmente manutenção baseada em tempo e manutenção baseada em condição. A aplicação de manutenção baseada na condição determina o cronograma de manutenção pelo estado real do equipamento, é mais realista e mais vantajosa de se aplicar do que a manutenção baseada no tempo [9].

Uma pesquisa abrangente de confiabilidade de disjuntores foi realizada pelo CIGRE Working Group 13.09 [10], que dividiu em cinco grupos de condições de operação e falhas em disjuntores que devem ser monitoradas e mantidas: (i) mecanismo de operação: a quebra de eixos, hastes e molas podem resultar em falhas graves dos disjuntores; (ii) componentes de controle e auxiliares: falhas de circuitos elétricos ou válvulas que podem não aceitar comando; (iii) partes de condução de corrente: que podem ser monitoradas ou diagnosticadas pela resistência de contato, temperatura de contato e corrente de carga; (iv) chaveamento: que inclui as características do percurso de contato, o tempo de operação, o tempo de arco e o desgaste do contato de arco; e (v) isolamento: falhas do meio de isolamento podem causar danos pesados aos disjuntores. Entre esses grupos, a maioria das falhas em disjuntor é devido ao

mau funcionamento do mecanismo de operação e circuitos de controle [11].

Nos últimos anos, houveram vários trabalhos relacionados a manutenção baseada na condição aplicado à disjuntores, porém grande parte das pesquisas se concentrou no monitoramento automatizado de suas condições e pouca pesquisa foi dedicada ao monitoramento de desgaste de contatos dos disjuntores.

Braunovic *et al.* [12] discutiram a correlação entre a temperatura e a resistência de contato. Em [13] e [14], os autores propuseram alguns métodos para medir a resistência de contato.

Kezunovic *et al.* [1], com base em um registro de formas de onda tiradas do circuito de controle do disjuntor, os autores desenvolveram uma maneira automatizada usando processamento avançado de sinais e técnicas especializadas para monitorar e analisar a interrupção do disjuntor.

Hoidalen e Runde [15] e Meng *et al.* [16], apresentaram técnicas de monitoramento de condições contínuas de disjuntores usando análise de vibração.

Natti e Kezunovic [17] investigaram a avaliação da probabilidade de falha de disjuntores através dos dados do circuito de controle disponíveis usando a abordagem Bayesiana e alguns índices de desempenho. A maioria das falhas de disjuntores observadas no campo estão correlacionadas aos circuitos de operação mecânica e de controle auxiliar.

Zheng [18] criou uma estrutura de detecção de falhas baseada em modelo para disjuntores a vácuo por meio de análise de bobina de disparo. Seguindo essa ideia, Razi-Kazemi *et al.* [19] propuseram uma técnica de detecção de falha mecânica inteligente com base nos resultados da observação da forma de onda da corrente da bobina de abertura/fechamento.

Dehghanian *et al.* [20] propuseram uma abordagem para identificar os disjuntores defeituosos usando os dados de monitoramento baseados em condições e as avaliações de impacto baseadas em segurança. Eles apresentaram uma estrutura de risco baseada em segurança para o planejamento de manutenção e identificação dos disjuntores. Outras pesquisas sobre o monitoramento e manutenção de disjuntores foram apresentadas em [9], [21] e [22].

Feizifar e Usta [2] propuseram um algoritmo para monitoramento das condições dos contatos elétricos do disjuntor baseado na potência do arco elétrico e sua energia.

Wang e Yang [23] apresentaram um método para encontrar a equação da curva de vida útil do contato do disjuntor. Realizaram dois estudos de caso e compararam o planejamento da manutenção baseada na condição com o planejamento de manutenção tradicional recomendado pelos fabricantes, o método proposto foi mais eficaz em evitar manutenção excessiva.

## 3 | MONITORAMENTO DE DESGASTE DOS CONTATOS DO DISJUNTOR

### 3.1 Número dos Ciclos de Operação

O método de monitoramento das condições do disjuntor mais simples é baseado na contagem dos ciclos de operação, que estima o desgaste mecânico do disjuntor. Neste método, existe um valor limite definido pelo fabricante, por exemplo, após 10.000 ciclos de operações, a inspeção ou manutenção do disjuntor é necessária. Este método não estima o desgaste elétrico dos contatos do disjuntor porque ignora o desgaste de contato causado por diferentes níveis de correntes interrompidas e o efeito de degradação das tensões de arco.

### 3.2 Corrente Interrompida Acumulada

O método de monitoramento chamado “Corrente Interrompida Acumulada” estima a condição de desgaste dos contatos principais do disjuntor através da aplicação da expressão matemática ( $k$  valor entre 1 e 2) de acordo com o tipo de disjuntor. Para aplicação dessa expressão é necessário realizar o monitoramento do número de operações, do tempo de arco e da corrente interrompida do disjuntor.

No caso específico do monitoramento dos disjuntores da SIG da UHE Belo Monte, o tempo do percurso dos contatos móveis é realizado por um transdutor rotativo instalado no mecanismo de movimentação da haste dos polos do disjuntor, conforme mostrado na Figura 2.

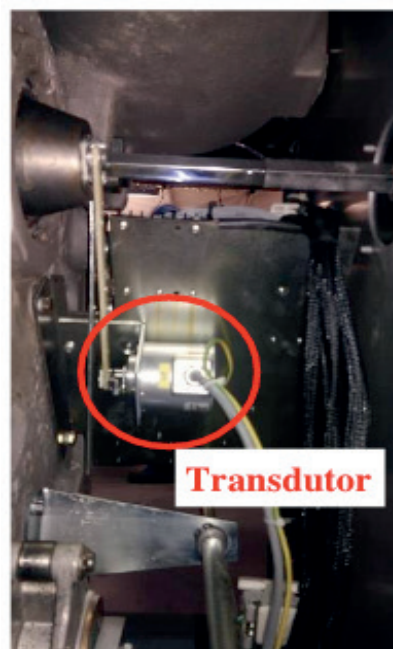


Figura 2 – Transdutor Rotativo do Mecanismo de Movimentação da Haste dos Polos do Disjuntor.

A corrente de interrupção é medida através de um transformador de corrente auxiliar conectado no secundário do transformador de corrente principal, conforme apresentado na Figura 3. Este tipo de projeto permite o registro das correntes durante



as operações de abertura e fechamento dos disjuntores, sem intrusão nos sistemas de proteção, controle e supervisão, conforme diagrama funcional apresentado na Figura 4.

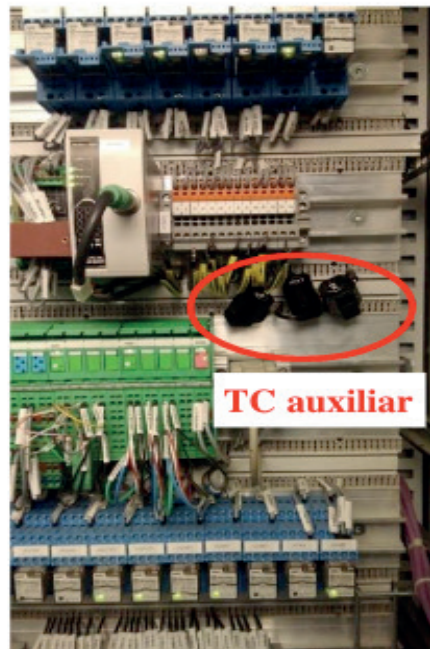


Figura 3 – Diagrama Funcional da Medição de Corrente Interrompida.

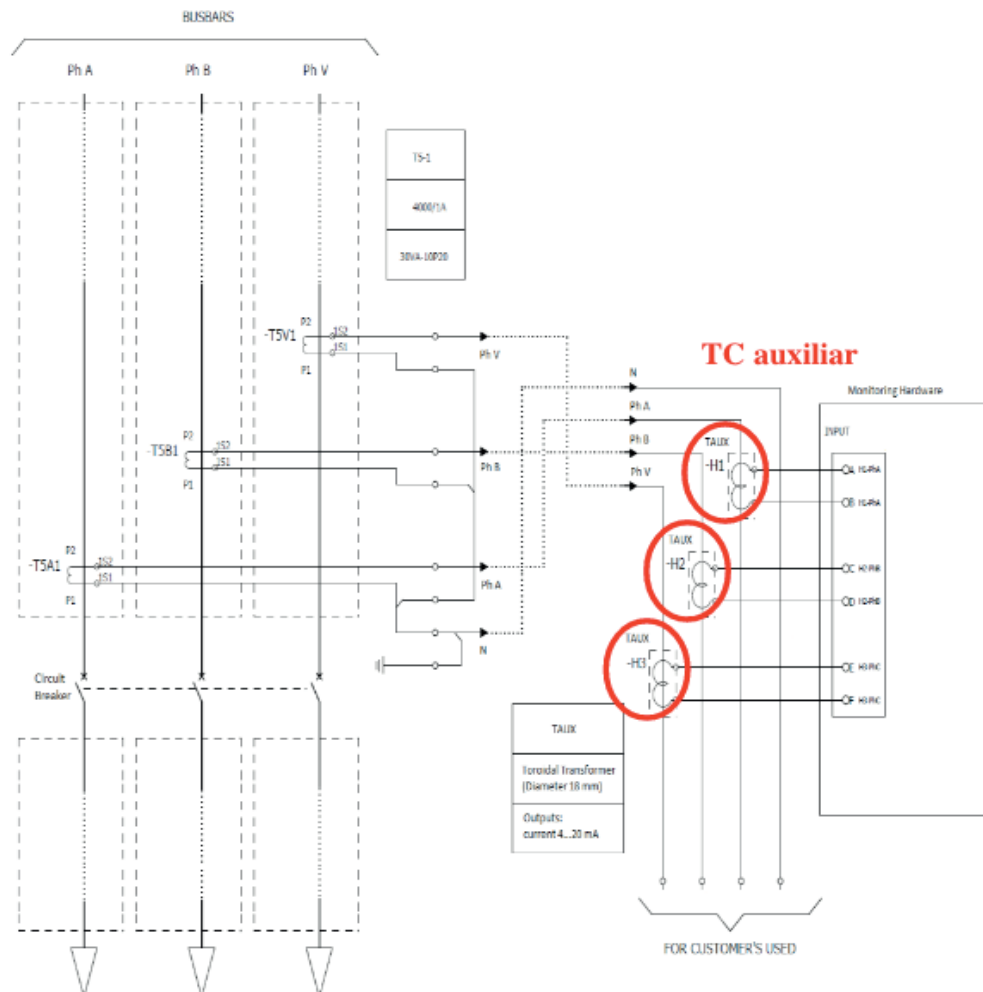


Figura 4 – Diagrama Funcional da Medição de Corrente Interrompida.

Na tela do sistema de monitoramento do disjuntor, referente ao desgaste dos contatos (Figura 5), é apresentada duas informações importantes para análise da vida útil do contato do disjuntor. A primeira é o gráfico de barras indicando a quantidade de aberturas do disjuntor com interrupção de corrente nas faixas 0-10 kA, 10-30 kA, 30-60 kA, 60-100 kA. Observa-se na Figura 5 que o disjuntor do vão 03 (Vão do Transformador Elevador TE-U3) realizou 175 (cento e setenta e cinco) interrupções de corrente, todas dentro da faixa 0-10 kA. As quantidades admissíveis de abertura do disjuntor para cada nível de corrente são especificadas pelo fabricante através da curva de vida do contato do disjuntor. O sistema de monitoramento gera um alarme, quando as quantidades de aberturas do disjuntor associada as faixas de corrente, for maior que o especificado na curva de vida do contato do disjuntor.

A segunda informação relevante da Figura 5 é o “Indicador de Desgaste” que apresenta o cálculo da soma das correntes interrompidas pelo disjuntor,

$$\text{Indicador de Desgaste (kA}^2 \cdot \text{s)} = \sum_{j=1}^n I_j^2 t_j \quad (1)$$

onde, n é o número de interrupções, I é a corrente interrompida (RMS) e t é o tempo de arco. A soma das correntes interrompidas associadas às operações de abertura do disjuntor é armazenada no sistema de monitoramento e comparada com um valor limite determinado pelo fabricante. Um gráfico de barra é utilizado para o acompanhamento visual do desgaste dos contatos do disjuntor e sistema de monitoramento gera um alarme quando o “Indicador de Desgaste” atingir um valor maior que o pré-estabelecido pelo fabricante.

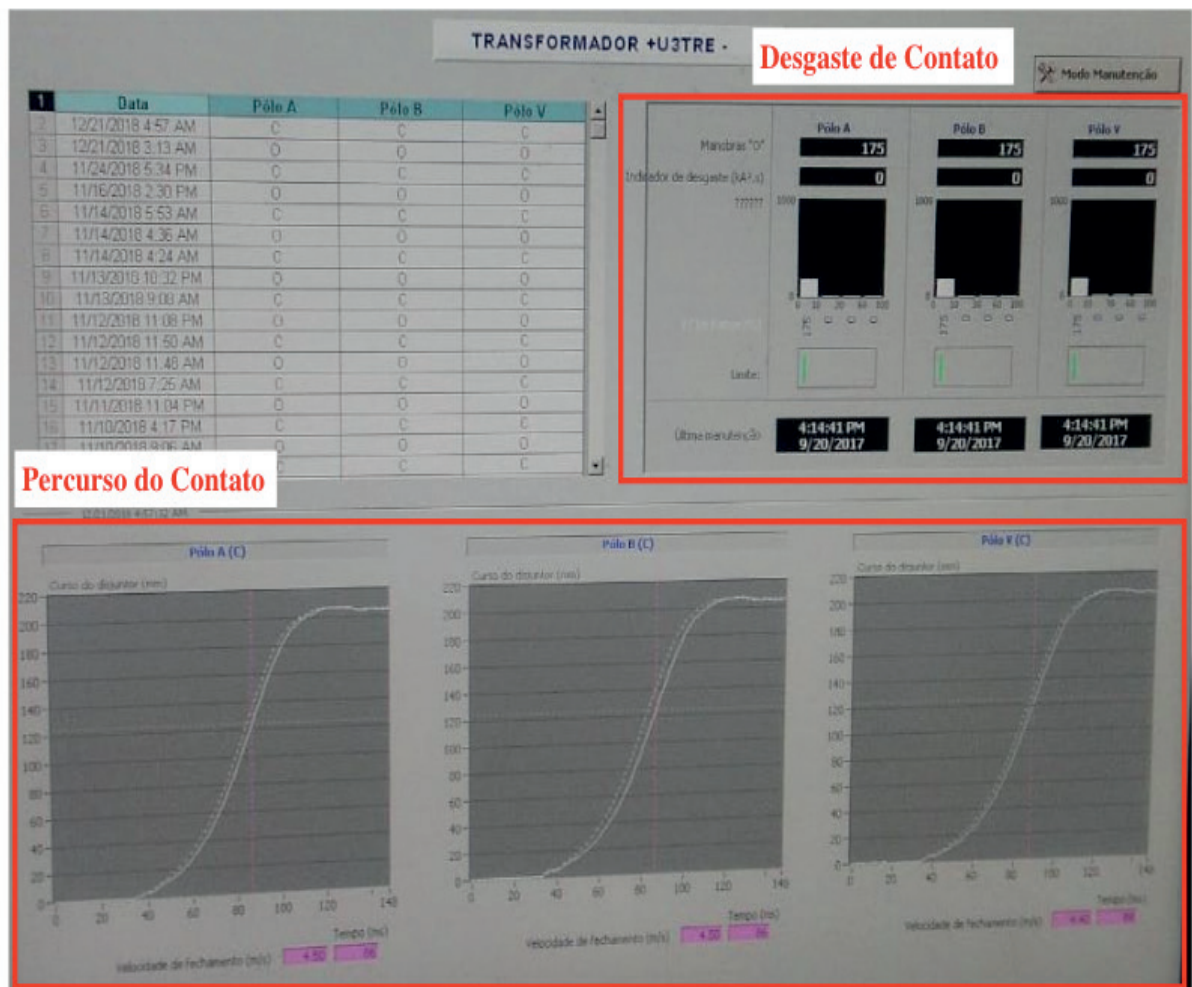


Figura 5 – Tela do Sistema de Monitoramento do Disjuntor.

#### 4 | DISCUSSÃO

O sistema de monitoramento dos disjuntores da SIG da UHE Belo Monte entrou em operação com todas suas funcionalidades em meados de setembro de 2018, devido o painel estar localizado entre os vãos 18 e 19. Dessa forma, atualmente está sendo realizado um acompanhamento do desgaste dos contatos dos disjuntores através do “Indicador de Desgaste” e do número de interrupções associadas as suas correntes.

Para avaliação da condição de desgaste de contato dos disjuntores da SIG da UHE Belo Monte, o “Indicador de Desgaste” será utilizado como indicador principal e o número de interrupção acumulada associado à corrente interrompida será utilizado como indicador secundário.

É importante ressaltar que a manutenção baseada na condição do disjuntor, especificamente relacionada ao desgaste dos contatos principais, está sendo aprimorada por fabricantes e pesquisadores. O método baseado na corrente interrompida acumulada ignora as tensões de arco, apesar do fato de que as tensões de arco realmente contribuem para o desgaste dos contatos do disjuntor.

Devido o instante inicial e final do arco elétrico serem desconhecidos quando da interrupção de corrente pelo disjuntor, o sistema de monitoramento realiza uma

estimação do tempo de arco elétrico com base no tempo de percurso dos contatos.

Os gráficos da curva do percurso do contato, linha pontilhada da Figura 5, fornecem informações importantes relacionados ao desempenho do conjunto mecânico do disjuntor, detecção de falhas no dispositivo de amortecimento, verificação de deslocamentos excessivos dos contatos e monitoração da pressão da mola do sistema de acionamento mecânico. Durante o comissionamento de cada disjuntor foi realizado ajuste no transdutor rotativo e gerada uma “curva de referência” do percurso do contato do disjuntor, linha contínua da Figura 5, que auxilia na análise comparativa entre as curvas.

## 5 | CONCLUSÕES

O sistema de monitoramento da SIG 500kV da UHE Belo Monte já em operação, se tornou uma ferramenta de uso das equipes de manutenção e proporcionou a adoção de uma filosofia de manutenção preditiva, permitindo assim acompanhar continuamente o desempenho e a degradação da vida útil dos disjuntores.

Os dados aquisitados e transformados em informações pelo sistema de monitoramento, determinam o momento ideal para intervenção nos disjuntores, proporcionando uma vida útil mais longa. A manutenção baseada na condição do disjuntor, utiliza métodos para diagnósticos eficazes e proporciona uma melhora na confiabilidade do equipamento, além de reduzir os custos de manutenção, pois somente após da ocorrência de alarme as causas serão analisadas.

A análise gráfica e numérica dos tempos de abertura e fechamento do disjuntor têm contribuído para detectar de forma preditiva anormalidades no conjunto mecânico do disjuntor.

O monitoramento dos contatos, por fase, do disjuntor da SIG 500kV da UHE Belo Monte, se mostrou um método prático, barato e confiável permitindo realizar com eficiência a manutenção preditiva, realizando a programação da manutenção do disjuntor com base nessa condição do desgaste de seus contatos.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. Kezunovic, Z. Ren, G. Latisko, D.R. Sevcik, J. Lucey, W. Cook and E. Koch, “Automated Monitoring and Analysis of Circuit Breaker Operation”, *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 20, No. 3, pp. 1910–1918, Jul. 2005. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.848466>.
- [2] B. Feizifar and O. Usta, “A Novel Arcing Power-Based Algorithm for Condition Monitoring of Electrical Wear of Circuit Breaker Contacts”, *IEEE Transactions Power Delivery (Early Access)*. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2882013>.
- [3] *IEEE Guide for Investigation, Analysis, and Reporting of Power Circuit Breaker Failures*, IEEE Std C37.10-2011, 2010.
- [4] *IEEE Guide for the Selection of Monitoring for Circuit Breakers*, IEEE Std C37.10.1-2000, 2001.

- [5] D.C.P. Araujo, M.E.G. Alves and F.A. Ribeiro, “Sistema de Monitoração de Disjuntores da SE Rio Verde – Uma Análise da Funcionalidade e Desempenho”, in *XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Florianópolis, Out. 2011.
- [6] J.R. Li, L.P. Khoo and S.B. Tor, “Generation of possible multiple components disassembly sequence for maintenance using a disassembly constraint graph”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 102, No. 1, pp. 51–65, Jul. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.01.012>.
- [7] G. Waeyenbergh and L. Pintelon, “Maintenance concept development: a case study”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 89, No. 3, pp. 395–405, Jun. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.09.008>.
- [8] S.O. Duffuaa, M. Ben-Daya, K.S. Al-Sultan and A.A. Andijani, “A generic conceptual simulation model for maintenance systems”, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 207–219, 2001. <https://doi.org/10.1108/13552510110404512>.
- [9] R. Ahmad and S. Kamaruddin, “An overview of time-based and condition-based maintenance industrial application”, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 63, No. 1, pp. 135–149, Aug. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.002>.
- [10] C. Jones, CIGRE working group 13.09 - monitoring and diagnostic techniques for switching equipment. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, pp. 1083–1087, 2001. <https://doi.org/10.1109/TDC.2001.971403>.
- [11] CIGRE working group A3.12. Failure survey on circuit breaker control systems summary report for Electra. *Electra*, Vol. 216, pp. 48–59, 2004.
- [12] M. Braunovic, V.V. Izmailov, A.E. Naumov and M.V. Novoselova, “Estimation of remaining lifetime of power connections using infrared thermography”. *Proceedings of the IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, pp. 234–239, 2009. <https://doi.org/10.1109/HOLM.2009.5284397>.
- [13] R.T. Souza and E.G. Costa, “Analysis of the correlation between the level of contact degradation and the dynamic resistance curve in circuit breakers”. *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 8, pp. 1104–1111, Jun. 2004. <https://dx.doi.org/10.17265/1934-8975/2014.06.017>.
- [14] Z. Stanisic and R. Neimanis, “A new ultra lightweight method for static and dynamic resistance measurements. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 1–4, 2010. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2010.5549820>.
- [15] H.K. Hoidalén and M. Runde, “Continuous monitoring of circuit breakers using vibration analysis”, *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 20, No. 4, pp. 2458–2465, Oct. 2005. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.855486>.
- [16] Y.P. Meng, S. Jia and M. Rong, “Condition monitoring of vacuum circuit breakers using vibration analysis”, *Proceedings of the International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, pp. 341–344, 2004. <https://doi.org/10.1109/DEIV.2004.1422616>.
- [17] S. Natti and M. Kezunovic, “Assessing circuit breaker performance using condition-based data and Bayesian approach”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 81, No. 9, pp. 1796–1804, Jun. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.04.010>.
- [18] Y. Zheng, “A model-based fault detection framework for vacuum circuit breaker by trip coil analysis”, *Journal of software*, Vol. 9, No. 1, pp. 251–257, Jan. 2014. <https://doi.org/10.4304/jsw.9.1.251-257>.
- [19] A.A. Razi-Kazemi, M. Vakilian, K. Niayesh and M. Lehtonen, “Circuit-breaker automated failure tracking based on coil current signature”, *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 29, No. 1, pp.

283–290, Feb. 2014. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2276630>.

[20] P. Dehghanian, M. Kezunovic, G. Gurrala, Y. Guan, “Security-based circuit breaker maintenance management”, *Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–5, 2013. <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672293>.

[21] A. Janssen, D. Makareinis and C.E. Sölver, “International surveys on circuit-breaker reliability data for substation and system studies”, *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 29, No. 2, pp. 808–814, Apr. 2014. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2274750>.

[22] P. Westerlund, P. Hilber, T. Lindquist and S. Kraftnat S, “A review of methods for condition monitoring, surveys and statistical analyses of disconnector and circuit breakers”, *Proceedings of the International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, pp. 1–6, 2014. <https://doi.org/10.1049/cp.2013.0668>.

[23] J-M. Wang, M-T. Yang, “Realization of circuit breaker condition-based main-tenance using optimal contact wear equation by the modified NM-PSOalgorithm”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 26, No. 3, pp. 627–640, Jun. 2015. <https://doi.org/10.1002/etep.2100>.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

AIS 10, 13  
Ajustes de proteção 22, 28, 34, 103  
Alocação de Recursos 161  
Anarede 48, 49, 52, 54, 60  
Anuidades 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20

### B

BAR 10, 225  
Biodiesel 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47  
BRR 10

### C

CAIMI 10, 12, 13, 15, 19  
Capacidade Instalada 1, 2, 3, 8  
Célula combustível 190, 191, 192, 196  
Cenário Energético 1  
Chave fusível 96, 98, 110, 114  
Chaves Automáticas 161, 162, 163, 164, 167, 168, 171  
Comunidades isoladas 36, 38  
Confiabilidade 20, 22, 24, 27, 49, 50, 53, 60, 84, 90, 121, 130, 136, 139, 145, 161, 162, 163, 165, 166, 167, 171, 172, 174, 192, 243  
Continuidade do Fornecimento 108, 163  
Conversor Boost 190  
Conversores 147, 148, 175, 176, 190, 191, 192, 201, 203, 204, 209, 248, 249, 252, 258, 259, 260  
Conversores conectados à rede 147  
Custo operacional 15, 96, 102

### D

DEC 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 100, 101, 105, 106, 107, 111, 119, 164, 171  
Densidade de Corrente 193, 196, 197, 198, 200, 201, 203, 205, 211, 213, 214, 248, 252, 256  
Descargas atmosféricas 89, 90, 92, 93, 94  
Desgaste de Contatos 128, 131

### E

Energia Solar Fotovoltaica 1, 2, 3, 6, 7, 8, 61

### F

Filtro LCL 147, 148, 149  
Fluxo de Potência 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 148  
Frequência 90, 97, 140, 147, 148, 151, 156, 163, 164, 175, 176, 177, 178, 181, 184, 185, 187, 191, 193, 196, 200, 201, 203, 204, 205, 207, 208, 209, 212, 216, 250, 251, 252, 260

## G

Geração de energia 3, 36, 38, 43, 45, 46, 263

Geração Distribuída 2, 3, 4, 6, 9, 61, 62, 64, 65, 72, 73, 161, 162, 167, 172

## I

Ilhamento de Geração Distribuída 161

Indicadores de Qualidade de Serviço 108, 118

Índices operacionais 89, 94

Interrupções 89, 90, 91, 92, 93, 94, 105, 106, 108, 118, 120, 134, 135, 163

Isolamento 124, 130, 139, 144, 164, 206, 207, 235, 238, 245

## M

Manutenção Preditiva 128, 129, 136

Monitoramento de Disjuntor 128

Monitoramento Digital 108

Monitoramento On-line 128, 129

## N

NERC PRC-027-1 21, 22

Núcleos Magnéticos 203, 252, 253, 257

## O

Otimização por enxame de partículas 147, 148, 152

## P

Perdas 48, 49, 50, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 142, 146, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 203, 204, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 249, 250, 251, 252, 254, 255, 256, 257, 258

Perdas Técnicas 48, 49, 50, 52, 53, 55, 57, 58, 60

Proteção de Sistemas Elétricos 21, 22

PSS Sincal 21, 22, 30, 31, 32, 35

## Q

Qualidade de Energia 96, 97, 107, 108, 109, 121

## R

Religador monofásico 96, 98, 99, 105

Rendimento 142, 143, 145, 176, 184, 186, 187, 190, 192, 193, 199, 200, 201, 248, 249, 252, 259

Resolução Normativa ANEEL N° 482/2012 61

## S

Siguard PSA 21, 22, 30, 31, 33



## T

Tecnologia PRE 89

Transformador a óleo 139, 141, 145

Transistores de potência 175, 177

## V

Vísceras de peixes 36, 43, 46

Volume 43, 57, 141, 188, 191, 193, 196, 199, 202, 203, 204, 207, 210, 211, 213, 214, 215, 216, 228, 250

