

MODELAGEM COMBINATÓRIA DE UM REGULADOR DE TENSÃO COM 8 CHAVES

Giancarlo França Aguiar (IFPR) E-mail: giancarlo.aguiar@ifpr.edu.br
Bárbara Cássia Xavier Cassins Aguiar (UFPR) E-mail: babi.eg@ufpr.edu.br
Volmir Eugênio Wilhelm (UFPR) E-mail: E-mail: volmirw@gmail.com
Helena Maria Wilhelm (UFPR) E-mail: helenaw@diagno.com.br
Humberto Alencar Pizza Silva E-mail: (USP) haps@usp.br

Resumo: Este trabalho ilustra um cenário dos sistemas de geração de energia e suas preocupações principais. Apresenta a normatização IEC 61850 e discursa sobre a importância da gestão no gerenciamento de ativos por parte das concessionárias prestadoras de serviços de energia. Introduce comentários sobre os transformadores de potência e investiga as principais grandezas que impactam na vida útil destes dispositivos de potência. Desenvolve também o modelamento matemático combinacional de um regulador de tensão com 8 chaves comutadoras e 4 Taps. Este modelo poderá ser reutilizado por engenheiros projetistas, possibilitando portanto, uma redução significativa com custos de engenharia, operação, diagnóstico, comissionamento, manutenção e monitoramento de ativos, que por sua vez, irão possibilitar um aumento de agilidade de toda a cadeia de vida dentro dos sistemas de automação em concessionárias.

Palavras-chave: Modelagem Combinatória; Reguladores de Tensão; Transformadores de Potência, IEC 61850.

MODELING COMBINATORIAL A VOLTAGE REGULATOR WITH 8 KEYS

Abstract: This work illustrates a scenario of power generation systems and their main concerns. It displays the regulation IEC 61850 and talks about the importance of management in managing assets by providing utilities of energy services. Introduces comments on power transformers and investigates the main variables that impact the life of these power devices. It also develops the combinational mathematical modeling of a voltage regulator with 8 toggle switches and 4 Taps. This model can be re-used by design engineers, enabling thus a significant reduction in engineering costs, operation, diagnostics, commissioning, maintenance and monitoring of assets, which in turn, will enable an increased agility of the entire chain of life within automation systems in dealerships.

Keywords: Combinatorial modeling; Voltage Regulators; Power transformers, IEC 61850.

1. INTRODUÇÃO

Com a demanda crescente no fornecimento de energia elétrica, para a população mundial atual e também para as gerações futuras, observa-se que é necessária a racionalização consciente e também um aumento no processo de geração e distribuição de energia.

Para Silva (2005), o setor energético nacional tem sofrido mudanças constantes e gerado elevado impacto para consumidores, indústrias e para as concessionárias de energia. Observou-se uma necessidade crescente da gestão sob os aspectos econômicos, ambientais, organizacionais e tecnológicos.

Conforme Higgins et al. (2010), esta necessidade veio à tona devido a um conjunto de preocupações fundamentais:

1. Insegurança Energética: existe uma preocupação mundial quanto as fontes de energia renováveis;
2. Emissão de Gases e Efeito Estufa: estuda-se o aumento na substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis;

3. Competição Internacional: a preservação do meio ambiente depende diretamente da concorrência entre economias em desenvolvimento e mercados internacionais;
4. Mercado escasso (poucas concessionárias e geradoras; e
5. Desempenho dos Prestadores de Serviço (concessionárias): apesar de regulamentado, o setor ainda possui monopólios.

Segundo Brand et al. (2004) e Petenel e Panazio (2012), as concessionárias de geração, distribuição e transmissão de fontes de energia, em geral, possuem equipamentos de diferentes gerações e distintos fabricantes, o que tornou os sistemas de monitoramento, controle e gestão das plataformas automatizadas de subestações de energia elétrica, por exemplo, modelos de difícil comunicação. Notou-se que a grande maioria dos equipamentos possuíam protocolos de comunicação muito particulares e com regras específicas.

Foi então no início dos anos 90, nos Estados Unidos, que o projeto batizado de *Utility Communications Architecture* (UCA) ganhou força no *Electric Power Research Institute* (EPRI). Esta pesquisa tinha como objetivo desenvolver um modelo de comunicação eficaz e comum a todos os fabricantes do setor energético. Paralelamente, um grupo de trabalho da *International Electrotechnical Commission* (IEC), conforme Gurjão et al. (2006) foi criado em 1995 para desenvolver uma padronização para os sistemas de comunicação em subestações. Percebendo que estavam trabalhando com um objetivo comum, os pesquisadores do EPRI e IEC reuniram esforços para desenvolver um padrão internacional conhecido como IEC 61850 *Communication Networks and Systems in Substation* ou Redes de Comunicação e Sistemas em Subestações.

Atualmente as concessionárias do setor energético realizam dentre muitas, as funções de gerador e consumidor das informações para o correto controle e manutenção dos equipamentos e sistemas de geração de energia, entretanto, existem ainda diferenças marcantes entre os *Energy Management System* (EMS) ou sistemas de gerenciamento de energia e os *Substation Automation Systems* (SAS) ou sistemas de automação de subestações.

Segundo Kostic et al. (2003) embora trabalhem com os mesmos equipamentos físicos, eles operam em planos distintos no detalhamento das informações operadas, nos resultados de eficiência e desempenho, e na responsabilidade dentro do controle de processos.

Objetivando aumentar a confiabilidade no controle desses processos, novos sistemas vêm sendo desenvolvidos. Os protocolos tendem a ser mais restritivos e o número de informações enviadas das subestações aos centros de controle tendem a ser minimizadas. Estudos da manutenção, monitoramento e diagnóstico da degradação e vida útil de equipamentos em concessionárias, como por exemplo, transformadores de potência e seus reguladores de tensão, podem contribuir para uma reorganização dos sistemas de geração de energia.

Este trabalho investigou as grandezas que mais impactam na vida útil de transformadores de potência e desenvolveu o modelamento matemático combinacional de um regulador de tensão com 8 chaves comutadores e 4 Taps. Esta pesquisa pode portanto, ser considerada uma contribuição na direção norteadora para o desenvolvimento de novos equipamentos de monitoramento e controle de ativos em tempo real.

2. GERENCIAMENTO DE ATIVOS

O mercado energético está cada vez mais competitivo, e as concessionárias objetivam promover seu crescimento combinando o aumento na geração (aliado a confiabilidade de transmissão e reduzidos investimentos no setor), a racionalização dos custos de operação e a rentabilização dos ativos presentes nestas operadoras.

O gerenciamento de ativos significa a garantia de maior disponibilidade de equipamentos, com redução na variabilidade no processo de gestão, redução nos custos de manutenção e por consequência um aumento no tempo de controle, maior qualidade no processo de produção e redução nas perdas de geração, transformação, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Desta forma foi inevitável para as empresas que almejavam serem competitivas, implementar soluções no gerenciamento de seus ativos. Entretanto, muitas operadoras do setor energético têm observado um acentuado envelhecimento de seus parques de geração devido a necessidade de operação dos sistemas em condições críticas, o que por ocasião, acelera o seu envelhecimento adicional e provoca um encurtamento de sua vida útil.

As operadoras deste mercado vêm sofrendo com o elevado número de falhas em seus ativos (por exemplo população de transformadores), e portanto, foi fundamental as pesquisas de gestão da vida útil de equipamentos e técnicas de diagnóstico que permitam quantificar o estado de degradação destes equipamentos.

3. TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Segundo Nynäs (2004), Silva (2005), Assunção (2007) e Segatto (2008), os transformadores de potência são equipamentos de elevado custo, requerem manutenção especial e são essenciais dentro dos sistemas elétricos de potência. Fazem parte do corpo de ativos estáticos dentro das concessionárias e tem como funcionalidade principal a transferência de energia elétrica de um circuito para outro, nutrindo a mesma frequência e variando normalmente os valores de corrente e tensão. A Figura 1 a seguir ilustra os componentes principais de um transformador de potência.



Figura 1 – Componentes de um Transformador de Potência
Fonte: Lorencini Brasil, Catálogo T.P.R.D., 1999

São partes fundamentais no estudo dos transformadores de potência: o núcleo (1), os enrolamentos (2), o tanque principal (3), o tanque de expansão de óleo (4), as buchas (5), o comutador sob carga (6), o acionamento do comutador (7), os radiadores (8), o painel de controle (9), o secador de ar (10) e os termômetros (11).

Em meados dos anos 70, algumas operadoras objetivando encontrar taxas de falhas e índices de desempenho em grandes transformadores, passaram a criar um banco de dados relatando as principais ocorrências de falhas em transformadores de potência. Contudo foi na década de 80 com uma publicação internacional do *Conseil International Des Grands Réseaux Électriques* (CIGRÉ), que as investigações da confiabilidade de transformadores tiveram um crescimento significativo (Pena, 2003 e Lopes, 2010).

Não há unanimidade quanto a modelos que sejam precisos no cálculo da vida útil restante de transformadores, já que sua sobrevida, está apoiada em um conjunto muito vasto de variáveis. Para Martins (2009), as concessionárias enfrentam um aumento na taxa de falhas em muitos de seus ativos e uma população de transformadores de potência se aproxima de seu fim.

Desta forma, torna-se fundamental o estudo e investigação na gestão de sua vida útil. Em geral, as taxas são elevadas nos primeiros anos de serviço e no final do seu tempo de vida, e portanto, modelos baseados na análise de risco, podem apoiar uma substituição estratégica de transformadores, contribuindo para um aumento da confiabilidade global dos sistemas de energia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para Mamede (1993), Virayavanich (1996), Milan (1998), Richardson (1998), Chu (1999), Brites (2002), GT A2.23 (2005), Silva (2005), Assunção (2007) e GT A2.05 (2013), como os transformadores são os dispositivos mais importantes e caros dentro de um sistema elétrico de potência, suas falhas inesperadas podem causar interrupções no fornecimento de energia elétrica e gerar uma conseqüente perda de confiabilidade junto a ANEEL e implicar no aumento de custos para as concessionárias e consumidores finais.

Diante deste cenário, o adequado funcionamento dos transformadores de potência é essencial para a operação dos sistemas elétricos, e portanto, muito têm-se pesquisado sobre as grandezas que impactam na sobrevida de transformadores de potência e na importância dessas grandezas para a modelagem de metodologias de predição da vida útil de transformadores. Os Quadros 1 e 2 ilustram um conjunto de resumos dos subsistemas e suas funções de monitoramento, e dos subsistemas e as principais grandezas em transformadores de potência que devem ser monitoradas, respectivamente.

Quadro 1 – Subsistemas e Funções de Monitoramento.

Subsistemas	Funções de Monitoramento
Buchas	- Estado da Isolação das Buchas
Parte Ativa	- Envelhecimento da Isolação - Umidade na Isolação Sólida - Gás no Óleo - Previsão de Temperaturas - Previsibilidade Dinâmica de Carregamento - Simulações de Carregamento
Comutador sob Carga	- Supervisão Térmica

	- Desgaste do Contato - Assinatura do Mecanismo - Umidade no Óleo - Previsão de Manutenção do Comutador
Tanque de Óleo	- Umidade no Óleo
Sistema de Preservação do Óleo	- Integridade do Sistema de Preservação de Óleo
Sistema de Resfriamento	- Eficiência do Sistema de Resfriamento - Previsão de Manutenção do Sistema de Resfriamento

Quadro 2 – Subsistemas e Grandezas Monitoradas.

Subsistemas	Grandezas Monitoradas
Buchas	- Capacitância ou Desvio Relativo de Capacitância - Tangente Delta
Parte Ativa	- Temperatura do Óleo - Temperatura dos Enrolamentos - Corrente nos Enrolamentos - Gás no Óleo
Tanque de Óleo	- Teor de Água no Óleo (ppm) - Saturação Relativa de Água no Óleo (%) - Saturação Relativa à Temp. Ambiente e de Referência - Ruptura da Bolsa do Tanque de Expansão
Comutador sob Carga	- Temperatura do Comutador - Corrente de Carga - Tensão de Linha - Posição de Tape - Toque do Acionamento - Teor de Água no Óleo (ppm) - Saturação Relativa de Água no Óleo (%) - Saturação Relativa à Temp. Ambiente e de Referência
Sistema de Resfriamento	- Corrente de Ventiladores ou Bombas - Vibração de Bombas
Outros	- Temperatura Ambiente

A Tabela 1 a seguir ilustra um resumo dos componentes monitorados e os principais aspectos que causam as maiores taxas de falhas em transformadores de potência. A literatura relata que os componentes que mais impactam na vida útil de transformadores de potência são: os enrolamentos, as buchas e as chaves comutadoras. Uma das funções mais importantes dentro dos alimentadores de distribuição, é o regulamento adequado de tensão. Como as cargas em alimentadores em geral estão variando, então deve haver um meio de regular a tensão de forma que cada usuário (cliente) receba uma tensão aceitável, e portanto, o estudo das chaves comutadoras se torna imprescindível. Segundo Caparó (2005), os reguladores mais empregados na literatura são: os reguladores de tensão tipo passo e os transformadores com mudança de tap de carga (LTC).

Tabela 1 – Aspectos que Causam Taxas de Falhas em Transformadores.

Componentes Monitorados	Causas de Falhas	Falhas Detectadas	Acompanhamento
Enrolamentos	- Aumento de temperatura acima dos limites - Forças radiais e axiais - Descargas parciais	- Deslocamento do próprio enrolamento ou de suas espiras - Afrouxamento do enrolamento	- Inspeções visuais internas - Medida das variações dos parâmetros - Método da programação da onda

	- Curto circuito entre espirais, bobinas e enrolamentos		- Análise em frequência - Medida da reatância - Medida das vibrações
Buchas	- Aumento de temperatura acima dos limites - Contaminação por unidade - Descargas parciais	- Envelhecimento do material das gaxetas - Formação de bolhas - Aquecimento em flanges metálicas	- Supervisão do nível de óleo - Inspeções visuais externas - Medições da tangente delta e capacitância - Análises do gás produzido
Chaves Comutadoras	- Falhas no dielétrico - Falta de alinhamento dos contatos - Mudança excessiva do tape	- Erosão dos contatos - Desgaste entre os contatos fixos e móveis	- Medição da corrente ou torque do motor do mecanismo - Temperatura dos fluídos - Supervisão vibro-acústica

5. MODELAGEM COMBINATÓRIA

O funcionamento dos comutadores de derivação sob carga depende do bom relacionamento e resultado entre os componentes mecânicos e elétricos do dispositivo. A Figura 2 a seguir ilustra a concepção/desenho do comutador sob carga modelo MR.

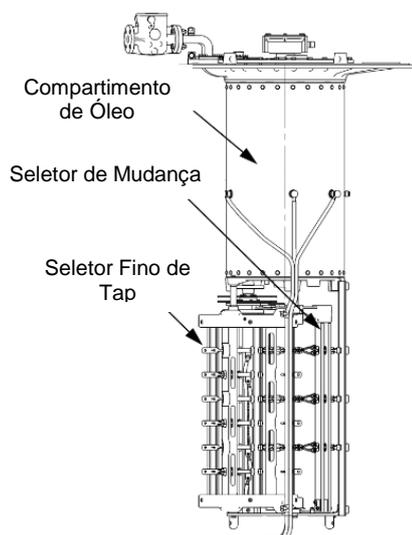


Figura 2 – Concepção do Comutador de Derivação sob Carga Modelo MR.

Fonte: <http://www.reinhausen.com>

O elevado número de topologias que objetivam representar a realidade dentro de circuitos eletrônicos, indica uma necessidade crescente do desenvolvimento de modelos matemáticos que possam auxiliar na simulação computacional de dispositivos eletrônicos. Segundo Felício (2006), a utilização de simulação digital demanda que os reguladores de tensão apresentem modelos matemáticos precisos e com necessidade de métodos numéricos cada vez mais otimizados para resolver tais modelos.

Os professores Faiz e Siahkollah (2002) estudaram várias configurações de comutadores sob carga, com o objetivo de encontrar um regulador de tensão com elevada tensão nos degraus e com baixo custo. Os autores sugerem que a configuração otimizada (menor custo: 39.333) possui seis enrolamentos, com 12 chaves comutadoras, e com 48 degraus de tensão. A Tabela 2 a seguir ilustra seus resultados.

Tabela 2 – Comparação de Configurações de Comutadores.

Taps	Comutadores	Degraus	Tensão (degraus)	Custo
6	12	48	167	39.333
8	16	80	100	40.000
7	14	90	89	43.250
7	14	62	129	41.382
14	14	48	167	86.088
11	11	47	170	55.100
11	11	53	151	50.969

A Figura 3 a seguir, ilustra respectivamente, uma topologia de um regulador de tensão tipo A, com 8 chaves que ajustam 7 degraus de regulação (figura à esquerda), e o mesmo regulador de tensão com uma configuração de 4 tiristores ($G_5, G_2, G_7, e G_4$) ativados (figura à direita).

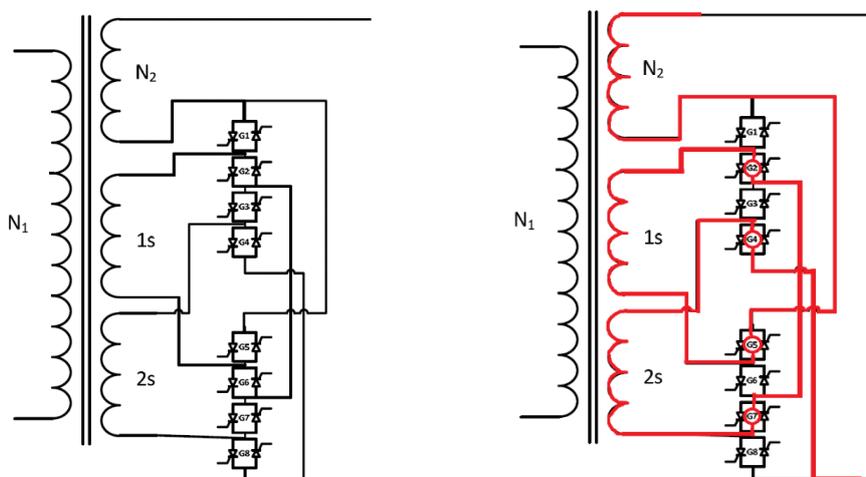


Figura 3 – Topologia de um Regulador de Tensão com 8 Chaves.

Fonte: Toh *et al.*, 2000 (modificado)

É possível estimar a tensão de saída (equação a seguir) na carga em função dos tiristores (dispositivos com maior habilidade para suportar tensões e correntes de operação) ativados (Toh, et al., 2000):

$$V_L = \text{Tensão de saída (na carga)} = V_S * \frac{(N_2 \pm 1S \pm 2S)}{N_1}$$

A Tabela 3 a seguir ilustra os percentuais de tensão que devem ser retificados, os 7 degraus de regulação, a relação de tensão na saída e as 16 possíveis configurações de chaves que devem ou não ser acionadas.

Tabela 3 – Configurações de Comutadores Acionados com 8 Chaves.

Linha	Tiristores Ativados	Tensão na Saída	Número de Degraus de Compensação	Sobretensão ou Afundamento
1	G_5, G_2, G_7, G_4	$V_S * (N_2 - 1S - 2S)/N_1$	-3	+7,5%
2	G_1, G_2, G_7, G_4	$V_S * (N_2 - 2S)/N_1$	-2	+5%
3	G_5, G_6, G_7, G_4	$V_S * (N_2 - 2S)/N_1$	-2	+5%
4	G_5, G_2, G_7, G_8	$V_S * (N_2 - 1S)/N_1$	-1	+2,5%
5	G_5, G_2, G_3, G_4	$V_S * (N_2 - 1S)/N_1$	-1	+2,5%
6	G_1, G_6, G_7, G_4	$V_S * (N_2 + 1S - 2S)/N_1$	-1	+2,5%

7	G_1, G_2, G_7, G_8	$V_S * N_2 / N_1$	Sem regulação	0%
8	G_1, G_2, G_3, G_4	$V_S * N_2 / N_1$	Sem regulação	0%
9	G_5, G_6, G_7, G_8	$V_S * N_2 / N_1$	Sem regulação	0%
10	G_5, G_6, G_3, G_4	$V_S * N_2 / N_1$	Sem regulação	0%
11	G_1, G_6, G_7, G_8	$V_S * (N_2 + 1S) / N_1$	+1	-2,5%
12	G_1, G_6, G_3, G_4	$V_S * (N_2 + 1S) / N_1$	+1	-2,5%
13	G_5, G_2, G_3, G_8	$V_S * (N_2 - 1S + 2S) / N_1$	+1	-2,5%
14	G_1, G_2, G_3, G_8	$V_S * (N_2 + 2S) / N_1$	+2	-5%
15	G_5, G_6, G_3, G_8	$V_S * (N_2 + 2S) / N_1$	+2	-5%
16	G_1, G_6, G_3, G_8	$V_S * (N_2 + 1S + 2S) / N_1$	+3	-7,5%

A primeira linha da Tabela 3 ilustra a configuração mostrada na Figura 3 anterior (Figura à direita), com uma sobretensão de +7,5%, e compensação de -3 de graus. As linhas 7, 8, 9 e 10 indicam uma passagem de tensão sem regulação. A linha 16 mostra um afundamento de -7,5% e compensação de +3 de graus. Nesta topologia, são encontradas 16 possibilidades de comutação de chaves, entretanto, existem somente 7 níveis de regulação.

A Figura 4 a seguir ilustra a mesma topologia com as 16 configurações modeladas, utilizando a teoria dos grafos com um diagrama em forma de árvore. A utilização do diagrama em árvore favorece a visualização dos possíveis modelos de combinações de acionamentos dos comutadores, além de oferecer menor trabalho computacional em relação a metodologia revisada na literatura (lógica proposicional – tabelas verdade). No processo de modelagem, a utilização de uma metodologia que simplifique o número de comutações gera menor esforço matemático, que por sua vez, resulta em menores tempos computacionais.

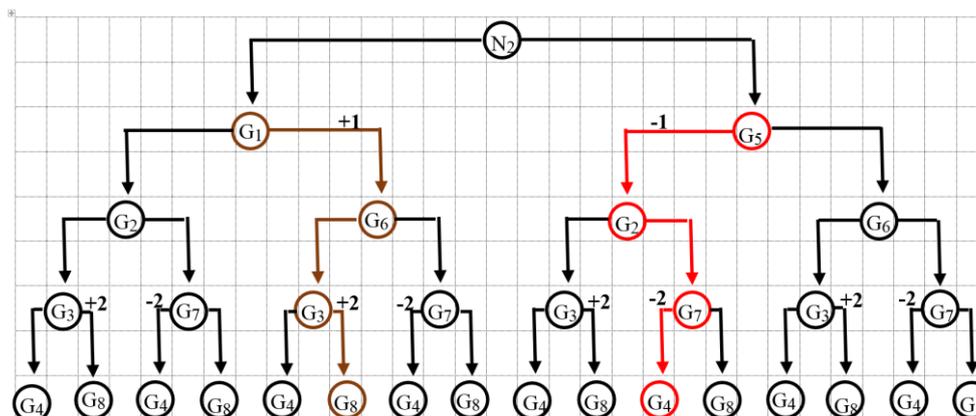


Figura 4 – Diagrama em Árvore para o Comutador com 8 Chaves.

Os caminhos pelos quais existem números significam que a corrente está sendo regulada (sobretensão ou afundamento). O caminho $G_1 - G_6 - G_3 - G_8$ em marrom, tem uma passagem pela bobina 1S ($G_1 - G_6$) e uma passagem pela bobina 2S ($G_3 - G_8$) totalizando 3 de graus de compensação, com um afundamento na tensão de -7,5%.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho ilustrou um cenário dos sistemas de geração de energia e suas preocupações principais. Fomentou sobre a normatização IEC 61850 e sobre a importância da gestão no gerenciamento de ativos por parte das concessionárias prestadoras destes serviços. Justificou o estudo dos transformadores de potência e ilustrou através de investigação as principais

grandezas que impactam na vida útil de transformadores de potência. Desenvolveu um modelamento matemático de um regulador de tensão com 8 chaves comutadoras, ilustrando esta topologia com um diagrama em forma de árvore. O estudo procurou dialogar sobre a vida útil dos transformadores de potência, e por sua vez, contribuir para uma reorganização da gestão nos sistemas de geração de energia.

REFERÊNCIAS

- [1] ASSUNÇÃO, T. C. B. N. *Contribuição à Modelagem e Análise do Envelhecimento de Transformadores de Potência. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, 2007.*
- [2] BRAND, K. P.; BRUNNER, C.; WIMMER, W. *Design of IEC 61850 based substation automation systems according to customer requirements. CIGRÉ, Session B5-103, 2004.*
- [3] BRITES, J. *Sistema de Automação para Gestão de Transformadores Baseado na Confiabilidade. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2002.*
- [4] CAPARÓ, J. L. C. *Modelagem de Transformadores de Distribuição para Aplicação em Algoritmos de Fluxo de Potência Trifásico. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UNESP, 2005.*
- [5] CHU, D.; LUX, A. *On-line Monitoring of Power Transformers and Components: A Review of Key Aspects. In: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference, Proceedings, 26-28, oct. 1999.*
- [6] DIETRICH, W. *CIGRE Working Group 05. An International Survey on Failures in Large power Transformers in Service. Journal Electra, n. 88, 1983.*
- [7] FAIZ, J.; SIAHKOLAH, B. *Optimal configurations for taps of windings and power electronic switches in electronic tap-changers. IEEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, vol. 149, n. 5, Sep. 2002.*
- [8] FELÍCIO, J. R. *Modelagem de Reguladores de Tensão Monofásicos com 32 Degraus para Estudos em Regime Permanente e Transitório. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFU, 2006.*
- [9] GCOI-CDE *Comissão de Desempenho de Equipamentos e Instalação. Relatório Técnico: Análise Estatística de Desempenho de Transformadores, 1996.*
- [10] GT A2.23. *Gerenciamento Histórico de Dados de Transformadores de Potência. Força Tarefa FT-01, Lista de Grandezas Monitoradas em Transformadores – CIGRE Brasil, Rio de Janeiro, agosto, 2005.*
- [11] GT A2.05. *Guia de Manutenção para Transformadores de Potência. CIGRE Brasil, Grupo de Trabalho A2.05, 2013.*
- [12] GURJÃO, E. C.; CARMO, U. A.; SOUZA, B. A. *Aspectos de Comunicação da Norma IEC 61850. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 2006.*
- [13] HIGGINS, N.; VYATKIN, V.; NAIR, N. K. C.; SCHWARZ, K. *Distributed Power System Automation With IEC 61850, IEC 61499, and Intelligent Control. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2010.*
- [14] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61850-1 Communication Networks and Systems in Substations Part 1: Introduction and Overview. IEC, pág. 36-38, 2003.*
- [15] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61850-6 Configuration Description Language for Communication in Electrical Substations Related to IEDs - Part 6, IEC, Tech. Rep., 2009.*
- [16] KOSTIC.; PREISS, O.; FREI, C. *Towards the formal integration of two upcoming standards: IEC 61970 and 61850. Power Engineering, 2003 Large Engineering Systems Conference, pág. 5-11, 2003.*

- [17] LOPES, Y. *SmartFlow: Sistema Autoconfigurável para Redes de Telecomunicações IEC 61850 com arcabouço OpenFlow*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense-UFF, 2013.
- [18] LOPES, J. I. *Metodologia de Gerência de Riscos na Operação e Manutenção de Transformadores de Potência*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, 2010.
- [19] MAMEDE, J. *Manual de Equipamentos Elétricos*. Vol. 2, Rio de Janeiro: Livros técnicos científicos editora Ltda, 1993.
- [20] MARTINS, M. A. G. *Gestão da Vida Útil dos Transformadores*. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, vol. 21, n. 3/4, 2009.
- [21] MILAN, M. *Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante*. 5° ed. São Paulo: Editora Egar Blücher Ltda, 1998.
- [22] NYNÄS, N. *Transformer Oil Handbook*. 1° ed., Sweden: Linderoths in Vingaker, 223 p., 2004.
- [23] PENA, M. C. C. *Falhas em Transformadores de Potência: uma Contribuição para Análise, Definições, Causas e Soluções*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2003.
- [24] PETENEL, F.; PANAZIO, C. *Análise de uma rede Smart Grid usando a norma IEC 61850 e dados de medições*. *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBrT'12*, Brasília, DF, 2012.
- [25] RICHARDSON, B. *Transformer Life Management, Bushings and Tapchangers*. In: *IEE Colloquium*, oct., 1998.
- [26] SEGATTO, E. C.; COURRY, D. V. *Redes Neurais Aplicadas a Relés Diferenciais para Transformadores de Potência*. *Sba: Controle & Automação*, vol. 19, n° 1, Natal, Mar. 2008.
- [27] SILVA, H. A. P. *Gerenciamento dos Ativos de Potência Utilizando Sistemas de Monitoramento e Diagnóstico*. Dissertação de Mestrado, Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia, Escola politécnica da USP, 2005.
- [28] TOH, C.W; LOCK, C.S.; CHEN, S. and CHOI, S.S. *A Voltage Quality Improvement Solution Using Step Dynamic Voltage Regulator*. *Power System Technology, International Conference*, vol. 2, 2000.
- [29] VIRAYAVANICH, S.; SEILER, A.; HAMMER, C.; WECK, K. H. *Reliability of On-Load Tap Changers with Special Consideration Experience with Delta Connected Transformer Windings and Tropical Environmental Conditions*. In: *Conference CIGRE*, 1996.
- [30] LORENCINI, Brasil. *Características Construtivas dos Transformadores de Potência*. *Catálogo Transformadores de Potência e Reatores de Derivação*, 1999. Disponível em: <http://www.lorencinibrasil.com.br/blog/caracteristicas-construtivas-dos-transformadores-de-potencia/>. Acesso em: 20/07/2015.
- [31] MASCHINENFABRIK, R. *Catálogo da Empresa de Engenharia de Energia MR*. Disponível em: <http://www.reinhausen.com>. Acesso em: 01/08/2015.