

## Modelagem de novos nós lógicos baseados na IEC 61850 para aplicação em sistemas de gestão de transformadores de potência

### RESUMO

Este trabalho apresenta o modelamento de dois novos Nós Lógicos para a norma IEC 61850. Estes modelos foram implementados no monitoramento de dois transformadores de transmissão e distribuição para a criação de um sistema de gestão destes ativos, cuja topologia foi elaborada com base na norma IEC 61850. Este trabalho contribui para a revisão do capítulo da norma que versa sobre monitoramento e supervisão de transformadores (IEC 61850-7-4) e inaugura modelos de Diagnostico e Expectativa de sua Vida Útil. A implementação foi realizada na área piloto do projeto (subestação Pilarzinho), de forma experimental e, avaliados e validados em campo, através da utilização de uma técnica não invasiva de avaliação da degradação do sistema de isolamento dos transformadores, a chamada Espectroscopia Dielétrica por Corrente de Polarização e Despolarização (PDC) e a Medida de Condutividade do Óleo Isolante (LCM). Foi implementado também o processo de secagem da parte ativa baseado em filtros moleculares e que consiste na remoção seletiva das moléculas de água do óleo isolante provocando um desequilíbrio entre a umidade dos materiais isolantes.

**PALAVRAS-CHAVE:** IEC 61850. Novos Nós Lógicos-LNs. Monitoramento e Diagnóstico. Vida Útil de Transformadores de Potência. Gestão de Ativos.

**Giancarlo de França Aguiar**

[giancarlo.aguiar@ifpr.edu.br](mailto:giancarlo.aguiar@ifpr.edu.br)

Professor e Coordenador de Ensino do Instituto Federal do Paraná – IFPR, campus Curitiba, Curitiba, Brasil.

**Bárbara de Cassia Xavier Cassins Aguiar**

[babi.eg@ufpr.br](mailto:babi.eg@ufpr.br)

Professora do Departamento de Expressão Gráfica da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, Brasil.

**Humberto de Alencar Pizza da Silva**

[haps@usp.br](mailto:haps@usp.br)

Pesquisador da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, Brasil.

**Volmir Eugênio Wilhelm**

[volmirw@gmail.com](mailto:volmirw@gmail.com)

Professor do Departamento de Matemática da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, Brasil.

**Helena Maria Wilhelm**

[helenaw@diagno.com.br](mailto:helenaw@diagno.com.br)

Pesquisadora da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, Brasil.

## INTRODUÇÃO

O Avanço tecnológico no desenvolvimento dos circuitos integrados possibilitou o surgimento de novos sistemas de automação em subestações. A automação na geração, distribuição e transmissão de energia avançou, passando de uma abordagem semi-automatizada para totalmente autônoma. A realidade governante é a de que cada vez mais os sistemas de geração, transmissão e distribuição do setor elétrico buscarão a minimização da intervenção humana e a maximização da automação remotamente supervisionada.

Conforme Bassi *et al.* (2008), Dominicis *et al.* (2011), Lopes *et al.* (2012), Badune, Vitolina e Maskalonok (2013) e Aguiar *et al.* (2016), integrar os sistemas de monitoramento aos dispositivos eletrônicos inteligentes, desenvolvidos por diferentes fabricantes, tem sido um dos principais desafios das concessionárias de energia elétrica. A carência de integração entre estes sistemas contribui para o aumento significativo do retrabalho profissional que, por sua vez, implica em uma deficiência na qualidade do fornecimento de energia elétrica.

Os dispositivos inteligentes, capazes de integrar os sistemas de automação da subestação, comunicam-se através de regras de sintaxe e semânticas chamadas de protocolos de comunicação. Tais protocolos, também foram evoluindo até que se chegou à norma IEC 61850 que objetiva padronizar as comunicações entre dispositivos em subestações e garantir a interoperabilidade dos mesmos.

Este trabalho apresenta algumas das implementações de um modelo de monitoramento de transformadores de transmissão e distribuição para a criação de um sistema de gestão destes ativos, cuja topologia foi elaborada com base na IEC 61850.

Foram identificados na lista da norma a inexistência de alguns Nós Lógicos LN's e também a carência de novos Grupos de LN's que, podem contribuir de maneira mais prática (sem a utilização de objetos genéricos da norma – GGIO's) e que contribuem de maneira expressiva para o monitoramento do estado deste tipo de ativo, possibilitando para que este trabalho contribua para a revisão do capítulo da norma que versa sobre monitoramento e supervisão de transformadores (IEC 61850-7-4) e inaugurando modelos de Diagnóstico e Expectativa de sua Vida Útil.

A implementação piloto incorpora camadas de diagnóstico e ações corretivas indicadas pelos prognósticos do sistema integrado de medições (formando uma plataforma de gestão de ativos), pela criação de dois novos Grupos de LN's, baseados no padrão IEC 61850: (B) - Diagnóstico da Degradação do Sistema de Isolamento de Transformadores; (E) - Expectativa de Vida Útil do Sistema de Isolamento de Transformadores, pós ação de recuperação do ativo.

Para subsidiar a estrutura dos novos Grupos de LN's foi implementado um sistema piloto de gestão de ativos para dois transformadores da Copel Transmissão e Distribuição (Subestação do Pilarzinho em Curitiba no Paraná), onde utiliza-se uma técnica não invasiva, de exatidão de avaliação da degradação do sistema de isolamento dos transformadores, a chamada Espectroscopia Dielétrica por Corrente de Polarização e Despolarização (PDC) e a Medida de Condutividade do

Óleo Isolante (LCM). Foi implementado também o processo de secagem da parte ativa baseado em filtros moleculares que consiste na remoção seletiva da molécula de água do óleo isolante provocando um desequilíbrio entre a umidade dos materiais isolantes, papel/óleo.

Nesta trabalho foram propostos também dois novos LN's para os grupos (B) e (E) respectivamente: "Degradação do Sistema de Isolamento de Transformadores (papel-óleo) - BIOP", que agrupa *Data Objects* (novos e existentes) para o monitoramento da degradação sinérgica do meio de isolamento sólido (ex.: papel kraft) e do meio isolante líquido (ex.: óleo mineral, óleo vegetal); e "Vida Útil Remanescente do Sistema de Isolamento de Transformadores - ELTR", que agrupa *Data Objects* (novos e existentes) para o monitoramento, diagnóstico e gestão da vida útil remanescente do isolamento de transformadores pelo envelhecimento proveniente da ação térmica e da umidade na parte ativa.

Tais LN's foram utilizados nos dispositivos eletrônicos inteligentes (IED's) da área piloto do projeto, de forma experimental (utilizando a Unidade Terminal Remota Hadrom Xtorm - da ALTUS, IEC 61850 compatível) e, avaliados e validados, em campo.

Esta pesquisa deverá ser submetida ao comitê normativo da IEC de forma que no futuro, os novos grupos de LN's e novos LN's possam ser reutilizados em IEDs, de qualquer fabricante, para sistemas de monitoramento e supervisão de transformadores de potência. Foi utilizada no desenvolvimento deste trabalho a ferramenta Master Tool Xtorm, também da ALTUS, como ferramenta para a configuração, programação, simulação, depuração e parametrização das funções de monitoramento desenvolvidos.

## DESENVOLVIMENTO

Segundo Brand, Brunner e Wimmer (2004), Ross e Kurose (2005), Silva (2005), Gurjão, Carmo e Souza (2006), Petenel e Panazio (2012), Aguiar (2017) e Silva *et al.* (2017), as concessionárias de produção, distribuição e redistribuição de fontes de energia, em geral, possuem equipamentos de diferentes gerações e distintos fabricantes, o que torna os sistemas de monitoramento, controle e gestão das plataformas automatizadas de subestações de energia elétrica, por exemplo, modelos de difícil comunicação. Nota-se que a grande maioria dos equipamentos possui protocolos de comunicação muito particulares e com regras específicas.

Surgiu a necessidade de se criar ferramentas capazes de minimizar este problema do setor energético. Objetivando otimizar a comunicação entre sistemas que, em geral, são distintos, é utilizado um conjunto de normas ou regras que definem os tipos de mensagens e a ordem em que elas devem ser realizadas. A este conjunto de regras e normas dá-se o nome de protocolo, por sua vez, os protocolos objetivam fazer com que os sistemas (mesmo que com arquiteturas internas distintas) consigam conversar com a mesma linguagem (entendimento na troca de informações).

Foi então em meados de 1990, nos Estados Unidos, que o projeto nomeado de *Utility Communications Architecture* (UCA) ganhou força no *Electric Power Reserch 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, Carmo e Souza (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 (Kostic, Preiss e Frei, 2003; Sidhu, Kanabar e Parikh, 2008; Higgins *et al.*, 2010; Mohagheghi *et al.*, 2011; Lopes, 2013; Machado, 2015 e Nascimento *et al.*, 2015).

Embora a norma IEC 61850 ainda esteja em desenvolvimento, ela tem despertado o interesse de institutos de pesquisa, concessionárias de energia e, principalmente, de fabricantes de equipamentos que almejam solucionar os problemas de comunicação entre equipamentos de diferentes gerações e a interoperabilidade na troca de informações entre equipamentos de diferentes fabricantes.

Apesar dos avanços significativos em controle, monitoramento e o aumento na frequência da utilização da normatização IEC 61850, ela ainda possui lacunas para o modelamento de dispositivos. Esse modelamento e monitoramento, principalmente em tempo real, de equipamentos apresentam vantagens como, por exemplo, a redução de intervenções desnecessárias com manutenção de equipamentos, aumento da segurança de operadores, redução nos custos com controle e prolongamento da vida útil de ativos.

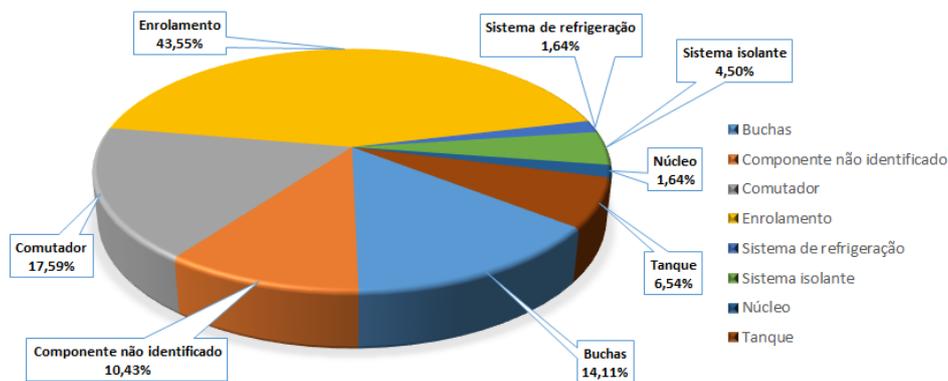
## TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Segundo Assunção (2007), Paulino (2008), Segatto e Coury (2008), Wilhelm *et al.* (2011), Silva *et al.* (2017) e Aguiar *et al.* (2020), 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 têm como funcionalidade principal a transferência de energia elétrica de um circuito para outro, com a mesma frequência e variando normalmente os valores de corrente e tensão. Objetivam minimizar as perdas de transmissão quando a corrente deve ser reduzida na transmissão de uma determinada potência elétrica.

E ainda conforme Nynas (2004), Silva, Bassi e Diogo (2004), Silva (2005) e Silva *et al.* (2016), a acelerada evolução tecnológica associada a um ambiente altamente competitivo levou as administradoras de sistemas de energia a buscarem novas formas de otimização da gestão de seus transformadores, por sua vez, uma boa gestão de equipamentos de potência passa pela maximização do aproveitamento da reserva da vida útil destes ativos.

Esta reserva de vida útil pode ser definida pela gestão eficiente dos subsistemas que ocasionam as maiores taxas de falhas e interrupções em transformadores de potência. Marques *et al.* (2015), relataram em sua pesquisa de 30 anos (1984 a 2014) realizada na concessionária CELG, os componentes com maiores interrupções nestes ativos (Figura 1).

Figura 1. Interrupções em Componentes de Transformadores



Fonte: Marques *et al.*, 2015 (modificado)

Os enrolamentos com 43,55%, os comutadores com 17,59% e as buchas com 14,11% são os dispositivos com maior incidência de interrupções em transformadores de potência e merecem atenção especial em um sistema de gestão de ativos de potência.

Os transformadores de potência são equipamentos que devem suportar elevados campos elétricos em parte de sua estrutura e, portanto, devem possuir uma resistividade muito elevada, assegurando a oposição à passagem de corrente elétrica de condução (Lelekakis, Martin e Wijaya 2012; Bai, Gao e Liu 2014 e Lima e Cabral 2014). O principal componente responsável por tal condição é conhecido como dielétrico e é constituído basicamente por material isolante. O dielétrico tem como principal objetivo modificar o valor dos campos elétricos existentes e desenvolver o isolamento entre os meios condutores do equipamento.

Os sistemas de isolamento têm em sua composição distintos tipos de materiais isolantes, que em sua vida útil serão submetidos a inúmeras variações térmicas e dielétricas. Por sua vez, estas oscilações poderão resultar em modificações significativas na composição de seus elementos formadores, o que possibilitarão uma falha no sistema de isolamentos e por consequência no equipamento.

Dado ao grande número de interrupções/falhas em transformadores devido às imperfeições nos sistemas de isolamento, torna-se fundamental a pesquisa e o desenvolvimento de melhorias contínuas em supervisão e monitoramento destes dispositivos (IEC 61850 2001, Kumar *et al.* 2011 e Aguiar 2017).

### MODELAGEM DE NOVOS NÓS LÓGICOS

A importância da investigação e modelagem de dispositivos está na reutilização das funções realizadas no passado e, portanto, a reutilização tem papel essencial na padronização e na minimização dos custos globais nas fases de

projeto, operação, engenharia, manutenção e monitoramento de sistemas de energia. Estas funções, por sua vez, dependem das informações do sensoriamento e de dispositivos eletrônicos *online* e/ou *off-line* presentes nos parques das concessionárias.

A maioria dos sistemas de gestão de ativos existentes se limita a sensorear, supervisionar e monitorar os parques energéticos atuais. Este trabalho teve como objetivo implementar módulos de prognóstico e diagnóstico, indicando níveis de alertas para o grupo de ações a serem tomadas para a recuperação do ativo (para as grandezas que indiquem a deterioração dos subsistemas do transformador a níveis críticos).

A normatização IEC 61850 possui um conjunto de nós lógicos que tratam de monitoramento, mas ainda é deficiente quanto à existência de nós lógicos direcionados as etapas de diagnóstico e demais fases relacionadas a gestão de ativos. Os nós lógicos existentes referenciam o monitoramento e estão alocados dentro do item “Supervisão” (*Logical node for supervision and monitoring – LN Group: S – IEC 61850 7.4 ed. 2*), ao passo que, poderia ser mais vantajoso separar estes itens de monitoramento de estado, diagnóstico e gestão de ativos dos grupos de supervisão, proteção e controle.

Muitas das técnicas recentes utilizadas pelas concessionárias possuem grandezas associadas que não têm seus correspondentes *Data Objects* catalogados na norma, o que justifica a criação dos novos grupos de nós lógicos, os novos nós lógicos e um novo conjunto de *Data Objects*, inaugurando assim, na norma, capítulos que possam tratar especificamente de etapas de diagnóstico, ações de recuperação do ativo e avaliação da eficácia das ações tomadas e indiretamente modelar estas fases compondo sistemas de gestão de ativos.

Esta pesquisa inovou, dentro das soluções tradicionais de monitoramento de transformadores, as etapas de diagnóstico com indicação de ações corretivas associadas. Neste caso, as técnicas de PDC são utilizadas para quantificar a umidade na parte ativa, indicando o fator de degradação do isolamento sólido, que na etapa de monitoramento contínuo, indica necessidade ou não de uma ação de recuperação e, a mesma técnica, na etapa de verificação da eficácia da ação de recuperação do ativo, indica o momento ideal para o retorno do ativo ao estado de monitoramento contínuo.

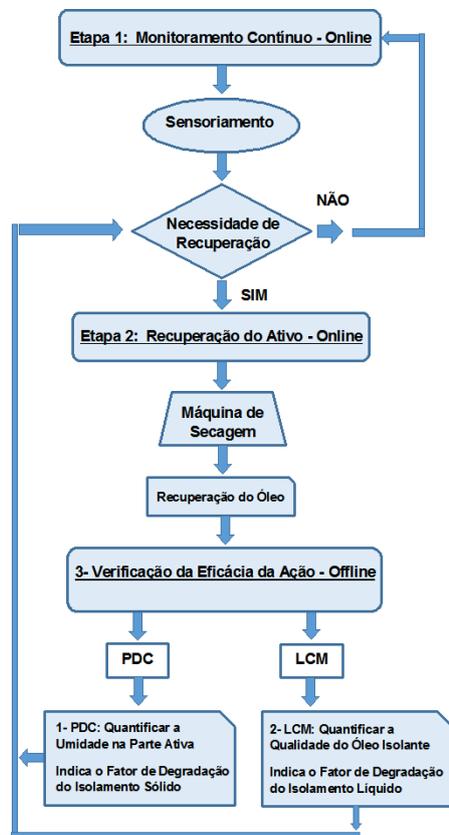
Os níveis de alarmes estabelecidos no sistema disparam ações de secagem da parte ativa que recomendam a aplicação de outra técnica inovadora, a Máquina de Secagem com filtros seletivos nano moleculares, possuindo a vantagem da não necessidade de desligamento do transformador.

Adicionalmente, foram implementados os módulos de quantificação da qualidade do óleo isolante através da técnica LCM, representando o fator de degradação do isolamento líquido que na etapa de monitoramento contínuo, indica necessidade ou não de uma ação de recuperação e, a mesma técnica, na etapa de verificação da eficácia da ação de recuperação do ativo, indica o momento ideal para o retorno do ativo ao estado de monitoramento contínuo.

Os níveis de alarmes estabelecidos no sistema podem disparar em combinação com os níveis de alarme dos valores de umidade na parte ativa da técnica PDC, por sua vez, ativando as ações de secagem do sistema papel-óleo que recomenda a aplicação da Máquina de Secagem com filtros de seletividade nano

molecular. A Figura 2 a seguir ilustra o Fluxograma desta Metodologia apresentada.

Figura 2. Fluxograma da Metodologia de Gestão de Ativos Implementada



Todas as grandezas ligadas a estas técnicas de monitoramento com diagnóstico que não constam na lista da norma IEC 61850, foram adicionadas como desenvolvimento deste trabalho. O Quadro 1 a seguir ilustra o extrato capitular da parte 5 da norma IEC 61850, onde está inserida a proposta de adição dos novos nós lógicos BIOP e ELTR.

Quadro 1. Proposta de novos nós lógicos – BIOP e ELTR - IEC 61850

ESTRUTURA CAPITULAR COM REFERÊNCIA A NORMA IEC 61850 (PARTE 5) Proposta de adição de novos nós lógicos (BIOP) e (ELTR)			
<b>11.5 LNs Related to Primary Equipment</b> The switchgear related logical nodes represent the power system, i.e. the world seen by the substation automation system via the I/Os. Using switchgear related LNs means a dedicated grouping of I/Os predefined according to a physical device such as a circuit breaker (see XCBR in 11.5.1).			
<b>Table 11.5.2 – LN for Monitoring by Sensors</b>			
Logical Node	IEC 61850- 5	IEC c37.2-96	Description or Comments
Insulation medium supervision	SIMS		LN to supervise the insulation medium, for example the gas volumes of GIS (Gas Insulated Switchgear) regarding density, pressure, temperature, etc.
Monitoring and Diagnostic for Arcs	SARC		LN to supervise the gas volumes of GIS (Gas Insulated Switchgear) regarding arcs switching or fault arcs.
Monitoring and Diagnostic for Partial Discharge	SPDC		LN to supervise the gas volumes of GIS (Gas Insulated Switchgear) regarding signatures of partial discharges.
Transformer Insulation Degradation (oil-paper)	BIOP		This LN is used for monitoring the degradation of solid-liquid insulation in power transformers. It is used to assess the condition of insulating paper and oil in power transformers. The insulation medium is a paper, such as Kraft, and oil (vegetal or Mineral) that are used in power transformers.
Transformer Expected Life	ELTR		This LN is used for monitoring and diagnostics of ageing rate in power transformers. This logical node is used to assess the ageing condition of power transformer and considers mainly the aspects of insulation system degradation (moisture) and thermal ageing affects (temperature, current).

These LNs represent the mentioned sensors with their entire inputs and communication relevant behavior in the SAS.

O nó lógico BIOP foi desenvolvido para monitorar a degradação do isolamento sólido-líquido em transformadores de potência, ou seja, ele é utilizado para avaliar a condição do papel e também do óleo isolante. O meio de isolamento pode ser um papel, como kraft, ou um óleo (vegetal ou mineral).

Enquanto que o nó lógico ELTR é usado para monitorar e diagnosticar a taxa de envelhecimento em transformadores de potência, este nó lógico é utilizado para avaliar a condição de envelhecimento do transformador e considera principalmente os aspectos da degradação do sistema de isolamento (umidade) e do envelhecimento térmico (temperatura e corrente).

Durante a etapa de modelamento do *Logical Node* BIOP foi necessária, adicionalmente, a criação da seguinte lista (Tabela 1) de novos *Data Objects*.

Tabela 1. Novos *Data Objects* – Nó Lógico BIOP

<b>Data Objects - Novo Nó Lógico BIOP</b>		
	<b>Grandeza Monitorada</b>	<b>Código IEC 61850</b>
<b>Técnica LCM</b>	Condutividade do Óleo Isolante	OilCndct
	Permissividade Relativa	RIPerm
	Fator de Perdas do Óleo	OilLosFact
	Tensão Interfacial do Óleo (não vegetal)	IntfacTen
<b>Técnica PDC</b>	Umidade Percentual Relativa no Papel	MstPap
	Tangente Delta do Sistema Óleo-Papel	LosFact
	Índice de Polarização do Papel	Pollnd
	Índice de Absorção do Papel	AbtInd
	Capacitância Complexa do Isolamento	CpxCapac

E durante a etapa de modelamento do *Logical Node* ELTR foi necessária, adicionalmente, a criação da seguinte lista (Tabela 2) de novos *Data Objects*. O Quadro 2 a seguir ilustra a proposta de extrato capitular documentando, de acordo com as exigências da norma IEC 61850, o novo grupo de nós lógicos (B) - Diagnóstico da Degradação de Sistema de Isolamento de Transformadores e o novo nó lógico BIOP - Degradação do Sistema de Isolamento de Transformadores Papel-Óleo.

Tabela 2. Novos *Data Objects* – Nó Lógico ELTR

<b>Data Objects - Novo Nó Lógico ELTR</b>		
<b>Modelos</b>	<b>Grandeza Monitorada</b>	<b>Código IEC 61850</b>
<b>Térmico, Químico e Elétrico</b>	Umidade no Papel	MstPap
	Grau de Polimerização	DgrPol
	Índice de Absorção	AbtInd
	2Furfuraldeído	2 - Fal
	Alarme de Temperatura do Sistema	ThrWar
	Alarme de Temperatura do Isolamento	TmpWm

Quadro 2. Extrato Capítular da Parte 7-4 Ed. 2 da Norma IEC 61850 com a Proposta de Adição do Grupo (B) e do Novo Nó Lógico BIOP

ESTRUTURA CAPÍTULAR COM REFERÊNCIA A NORMA IEC 61850 (PARTE 7-4 ED.2 CAPÍTULO 5) Proposta de adição de novo Grupo de LN (B) e novo nó lógico (BIOP)				
<b>5.XX Logical Nodes for Diagnostic of Power Transformers Insulation Condition</b>			<b>LN Group: B</b>	
<b>5.XX.X Modelling remarks</b> Table X gives the relation between IEC 61850-5 and IEC 61850-7-4 for supervision, monitoring and diagnostic of degradation for power transformer's LNs. Table X – Relation between IEC 61850-5 and IEC 61850-7-4 regarding other LNs for Degradation monitoring and diagnostic of power transformer.				
Functionality	Defined in IEC 61850-5 by LN	Modelled in IEC 61850-7 by LN	Comments	
Insulation medium supervision	SIMS	SIML SIMG	Insulation liquid such as oil	
Tap changer supervision	YLTC	YLTC	Drive supervision part of XCBR and XSWI	
Supervision of operating Mechanism	XCBR XSWI	SOPM	Drive supervision part of XCBR and XSWI	
Power transformer supervision	YPTR	YPTR	Supervision part of YPTR	
Switch supervision	SSWI	SSWI	Supervision part of YPTR	
Circuit breaker supervision	XCBR	SCBR	Supervision part of YPTR	
<b>Diagnostic of transformer insulation condition</b>	<b>BIOP</b>	<b>BIOP</b>	<b>Transformer insulation oil-paper synergetic degradation</b>	
<b>5.XX.X LN: Transformer insulation degradation (oil-paper) Name: BIOP</b>				
This LN is used for monitoring the degradation of solid-liquid insulation in power transformers. It is used to assess the condition of insulating synergetic effects between paper and oil in power transformers. The insulation medium is a paper, such as kraft, and oil (vegetal or mineral) that are used in power transformers. Refer to LN SIML and SIMG for other functions and for a more complete modelling of processes. For other measuring objects related to the same IED, a new instance of BIOP may be used. It contains complementary data objects for paper degradation monitoring. If new measuring point(s) is/are related to a new IED, a new instance of BIOP shall be used.				
BIOP Class				
Data object name	Common data class	Explanation	T	M/O/C
LNName		The name shall be composed of the class name, the LN-Prefix and LN-Instance-ID according to IEC 61850-7-2, Clause 22.		
Data objects				
Status information				
InsAlm	SPS	Insulation Paper Critical		M
InsBlk	SPS	Insulation Paper not Safe (block device operation)		O
InsTr	SPS	Insulation Paper Dangerous (trip for device isolation)		O
MstAlm	SPS	Moisture Alarm		O
MstWrm	SPS	Moisture Warning		O
Measured and metered values				
Mst	MV	Moisture Content in Insulating Paper (in %)		M
LosFact	MV	Loss Factor (tan delta oil-immersed paper)		O
Pollnd	MV	Polarisation Index		O
AbtInd	MV	Absorption Index		O
Capac	MV	Capacitance (in F)		O
CpxCapac	MV	Complex Capacitance (in F)		O
Ris	MV	Resistance (in Ohms)		O
RIPerm	MV	Relative Permittivity		O
OilCndct	MV	Conductivity of Oil (pS/m)		O
OilLosFact	MV	Loss Factor (tan delta) of oil		O
Tmp	MV	Insulation Liquid Temperature		O
IntfacTen	MV	Interfacial Tension (mN/m)		O
Controls				
OpCntRs	INC	Resettable Operation Counter		O

O Quadro 3 ilustra a proposta de extrato capitular documentando, de acordo com as exigências da norma IEC 61850, o novo grupo de nós lógicos (E) - Expectativa de Vida Útil do Sistema de Isolamento de Transformadores e o novo nó lógico ELTR - Vida Útil Remanescente do Sistema de Isolamento de Transformadores.

Estes extratos devem pertencer à parte 7-4 Ed2 da norma IEC 61850 e contém a proposta de adição dos novos grupos (B) e (E) e dos novos nós lógicos BIOP e ELTR com suas descrições e seus objetos de dados associados.

O nó lógico BIOP é utilizado para monitorar a degradação do isolamento sólido-líquido (condição de efeitos sinérgicos isolantes entre papel e óleo) em transformadores de potência. O meio de isolamento pode ser um papel (como o kraft) e o óleo (vegetal ou mineral).

Quadro 3. Extrato Capítular da Parte 7-4 Ed. 2 da Norma IEC 61850 com a Proposta de Adição do Grupo (E) e do Novo Nó Lógico ELTR

ESTRUTURA CAPÍTULAR COM REFERÊNCIA A NORMA IEC 61850 (PARTE 7-4 ED.2 CAPÍTULO 5) Proposta de adição de novo Grupo de LN (E) e novo nó lógico (ELTR)				
<b>5.XX Logical Nodes for Transformer Insulation Expected Life</b>		<b>LN Group: E</b>		
<b>5.XX.X Modelling remarks</b> Table Y gives the relation between IEC 61850-5 and IEC 61850-7-4 for supervision, monitoring and diagnostic of condition degradation of power transformer insulation's LNs. Table Y – Relation between IEC 61850-5 and IEC 61850-7-4 regarding other LNs for supervision, monitoring, diagnostic and expected life of power transformer.				
Functionality	Defined in IEC 61850-5 by LN	Modelled in IEC 61850-7 by LN	Comments	
Insulation medium supervision	SIMS	SIML SIMG	Insulation liquid such as oil	
Tap changer supervision	YLTC	YLTC	Drive supervision part of XCBR and XSWI	
Supervision of operating Mechanism	XCBR XSWI	SOPM	Drive supervision part of XCBR and XSWI	
Power transformer supervision	YPTR	YPTR	Supervision part of YPTR	
Switch supervision	SSWI	SSWI	Supervision part of YPTR	
Circuit breaker supervision	XCBR	SCBR	Supervision part of YPTR	
<b>Diagnostic of transformer insulation condition</b>	<b>BIOP</b>	<b>BIOP</b>	<b>Transformer insulation oil-paper synergetic degradation</b>	
<b>Expected life time of transformer insulation</b>	<b>ELTR</b>	<b>ELTR</b>	<b>Transformer insulation ageing due to thermal effects and moisture</b>	
<b>5.XX.X LN: Transformer Expected Life</b>		<b>Name: ELTR</b>		
This LN is used for monitoring and diagnostics of ageing rate in power transformers insulation system. This logical node is used to assess the ageing condition of power transformer insulation and considers mainly the aspects of insulation system degradation (moisture) and thermal ageing effects (temperature, current etc.). It contains complementary data objects for the condition monitoring of system insulation degradation concerning transformer insulation ageing. Refer to LN PTTR for all thermal overload functions, where, depending on the algorithm, that LN describes either a temperature or a current (thermal model). For a more complete modelling of processes, the Temperature data objects are also provided by other LNs. Examples are the hot spot temperature in LN YPTR or the isolation gas temperature in LN SIMG, and other data objects from LN BIOP as well.				
ELTR				
Data object name	Common data class	Explanation	T	M/O/C
LNName		The name shall be composed of the class name, the LN-Prefix and LN- Instance-ID according to IEC 61850-7-2, Clause 22.		
Data objects				
Status information				
AgeRte	SPS	Ageing Rate Warning (transformer insulation)		M
ThmWrm	SPS	Thermal Warning		M
TmpWrm	SPS	Insulation Liquid Temperature Warning		O
MstWrm	SPS	Moisture Warning		O
Measured and metered values				
MstPap	MV	Moisture conten t in insulating paper (in %)		O
LosFact	MV	Loss Factor (tan delta oil-immersed paper)		O
PolInd	MV	Polarisation index		O
AbtInd	MV	Absortion index		O
2Fall	MV	2-Furfuraldehyde (in ppm from oil)		O
DgrPol	MV	Degree of Polymerisation		O
OilTmp	MV	Insulation Liquid Temperature		O
H <sub>2</sub> O	MV	Relative Saturation of Moisture in Insulating Liquid (in %)		O
H <sub>2</sub> OPap	MV	Relative Saturation of Moisture in Insulating Paper (in %)		O
Controls				
OpCntRs	INC	Resettable Operation Counter		O

O nó lógico ELTR é utilizado para o monitoramento e diagnóstico da taxa de envelhecimento no sistema de isolamento (condição de envelhecimento do sistema de isolamento) em transformadores de potência. Este nó lógico considera principalmente os aspectos da degradação do sistema de isolamento (umidade) e seus efeitos de envelhecimento térmico (por exemplo, temperatura, corrente).

O Quadro 4 a seguir ilustra a proposta de extrato capítular documentando, de acordo com as exigências da norma IEC 61850, os novos *Data Objects* para atender os novos nós lógicos BIOP e ELTR.

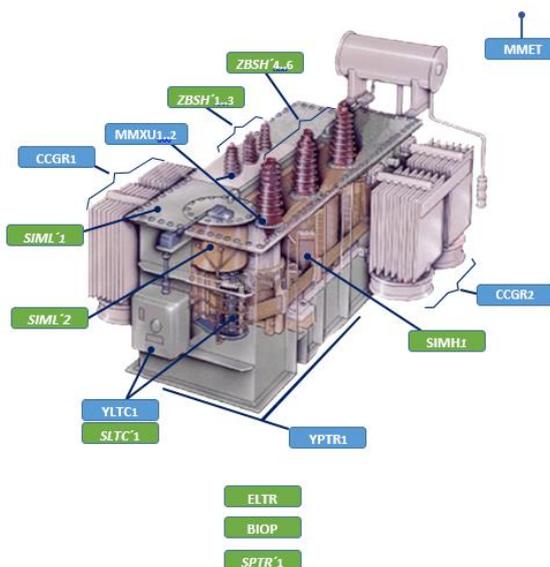
Quadro 4. Extrato Capítular da Parte 7-4 Ed. 2 da Norma IEC 61850 com a Proposta de Adição dos Novos *Data Objects*

ESTRUTURA CAPÍTULAR COM REFERÊNCIA A NORMA IEC 61850 (PARTE 7-4 Ed. 2 – CAPÍTULO 6)	
<i>Data Objects</i> complementares para os novos grupos LN (E) e LN (B) e novos nós lógicos (ELTR) e (BIOP)	
<b>6 Data Object Name Semantics</b>	
In Table 10, the data objects used in Clause 5 are described. The meaning of Boolean values are FALSE = 0, TRUE = 1.	
<b>Table 10 – Description of Data Objects</b>	
Data Object Name	Semantics
2Fal	2-Furfuraldehyde (in ppm from oil)
AbtInd	Absortion index
CpxCapac	Complex Capacitance (in F)
DgrPol	Degree of polymerisation
InfacTen	Interfacial Tension (mN/m)
LosFact	Loss Factor (tan delta oil-immersed paper)
MstPap	Moisture content in insulating paper (in %)
OilCndct	Conductivity of oil (pS/m)
OilLosFact	Loss Factor (tan delta) of oil
OilTmp	Insulation liquid temperature
PolInd	Polarisation index
RIPerm	Relative permittivity
ThmWrn	Thermal Warning
TmpWrn	Insulation liquid temperature warning

O Extrato ilustra os objetos de dados complementares criados, sendo os dados provenientes de sensores em campo (Subestação do Pilarzinho - COPEL - Paraná), ou lógicas como as realizadas com o CDC (*Common Data Class*), sendo do tipo MV (*Measured Value*), ou SPS (*Single Point Status*) apenas para os alarmes e/ou *warnings* criados.

O modelamento dos nós lógicos representa um conjunto de informações de dados monitorados e são definidos de acordo com a normatização IEC 61850 como, por exemplo, a informação/medição da “Temperatura do Óleo” que pode ser determinada no nó lógico SIML, e a “Temperatura do Transformador” encontrada no nó lógico SPTR. A Figura 3, a seguir, ilustra alguns nós lógicos estudados e trabalhados nesta pesquisa (Projeto USP-COPEL) e a complementação da norma com os novos nós lógicos BIOP e ELTR.

Figura 3. Alguns Nós Lógicos para Transformadores de Potência de Acordo com a Normatização IEC 61850



Para o monitoramento de Buchas, a Figura 3 anterior, apresenta, por exemplo, os nós lógicos ZBSH (1 ... 6), sendo os atributos de dados do nó lógico ZBSH'1 a Capacitância Absoluta (AbsReact), o Fator de Perdas - Tangente Delta (Losfact), a Capacitância Relativa da Bucha (React), a Capacitância de Referência da Bucha no Comissionamento (RefReact), o Fator de Potência de Referência no Comissionamento (RefPF), e o Tempo de Operação (OpTmh).

### CONSIDERAÇÕES FINAIS DESTA PESQUISA

Esta pesquisa, estudo e aprofundamento da normatização IEC 61850, ilustrou algumas brechas na norma. Principalmente, a oportunidade de criação e desenvolvimento de novos nós lógicos, para suprir as novas tecnologias e seus sensoriamentos de grandezas ainda não modeladas, entretanto, são fundamentais para o desenvolvimento de um sistema de gestão de ativos preciso e eficiente.

Foram identificados na lista da norma a inexistência de alguns LN's e também a carência de novos Grupos de LN's, que podem contribuir de maneira mais prática (sem a utilização de objetos genéricos da norma – GGIO's) e que contribuem de maneira expressiva para o monitoramento do estado deste tipo de ativo, possibilitando que este trabalho contribua para a revisão do capítulo da norma que versa sobre monitoramento e supervisão de transformadores (IEC 61850-7-4) e inaugurando modelos de Diagnóstico e Expectativa de sua Vida Útil.

A criação dos novos nós lógicos apresenta uma evolução na abrangência da aplicação da norma e, portanto, com os sistemas mais completos e elaborados (ou seja, que avancem outras camadas que não somente as de controle, supervisão e monitoramento), certamente poderão, através das ações de diagnóstico do ativo, colaborar para o aumento da qualidade e confiabilidade nos diagnósticos com base no monitoramento de estado dos equipamentos de potência.

Os modelos propostos neste trabalho permitiram uma pré-avaliação de equipamentos do sistema elétrico (dois transformadores de potência), podendo prever condições que só poderiam ser conhecidas diante de uma falência do sistema real.

Os novos modelos, servirão de base para que os fabricantes de soluções com IEC 61850, inovem com dispositivos mais modernos e compostos com recursos mais avançados. Em nível de *Bay* poderão contemplar módulos integrando monitoramento, diagnóstico e tomada de decisão, com ações locais de recuperação do ativo e, neste caso, criar verificadores de eficácia de intervenções no equipamento e, retomada do monitoramento contínuo, fazendo a gestão do ativo e contemplando a análise com a expectativa de vida útil do equipamento, através da análise e geração das suas curvas de envelhecimento. Diante deste cenário, o transformador poderá funcionar em seu limite máximo seguro e, operar em sua plenitude, elevando assim, a sua longevidade.

As técnicas inovadoras de diagnóstico e de recuperação do ativo, objetivam também neste trabalho, quantificar com maior precisão a umidade na parte ativa do transformador, e assim, diagnosticar o estado de degradação do papel (através da técnica PDC), e ao mesmo tempo, realizar uma avaliação da qualidade do óleo isolante (LCM) do transformador e do comutador sobre carga. Associada a técnica de regeneração do sistema de isolamento papel-óleo (online – sem o desligamento

do transformador), esta metodologia está servindo para validar com sucesso a modelagem proposta com base na IEC 61850 e seus novos grupos de LNs e nós lógicos.

As concessionárias, por sua vez, poderão destacar a otimização de seus recursos de engenharia nas implementações e integração de seus sistemas, dado a menor complexidade de modelagem e oportunidade de reutilização destas funções e, por consequência, terão uma significativa melhoria da qualidade do gerenciamento dos seus ativos e aumento da eficácia das suas ações.

## Modeling of New Logical Nodes Based on IEC 61850 for Application in Power Transformer Management Systems

### ABSTRACT

This work presents the modeling of two new Logical Nodes for the IEC 61850 standard. These models were implemented in the monitoring of two transmission and distribution transformers to create a management system for these assets, whose topology was elaborated based on the IEC 61850 standard. This work contributes to the revision of the chapter of the standard that deals with monitoring and supervision of transformers (IEC 61850-7-4) and inaugurates models of Diagnosis and Expectation of its Useful Life. The implementation was carried out in the pilot area of the project (Pilarzinho substation), experimentally and, evaluated and validated in the field, through the use of a non-invasive technique for evaluating the degradation of the transformers isolation system, the so-called Dielectric Current Spectroscopy Polarization and Depolarization (PDC) and the Insulating Oil Conductivity Measure (LCM). The active part drying process based on molecular filters was also implemented, which consists of the selective removal of water molecules from the insulating oil, causing an imbalance between the moisture of the insulating materials.

**KEYWORDS:** IEC 61850. New Logical Nodes-LNs. Monitoring and Diagnosis. Service Life of Power Transformers. Asset Management.

## REFERÊNCIAS

Aguiar, G. F.; Aguiar, B. C. X. C.; Wilhelm, V. E.; Wilhelm, H. M.; Silva, H. A.; Grimoni, J. A. B. Implementation New Logical Nodes – BIOP and ELTR Based on IEC 61850. IEEE Latin America Transactions, vol. 18, n°. 8, August 2020.

Aguiar, G. F. Modelagem de Novos Nós Lógicos Baseados na IEC 61850 Através da Concepção dos Módulos de Diagnóstico da Degradação e de Ações Corretivas para Aplicação em Sistemas de Gestão de Transformadores de Potência. Tese de Doutorado, PPGMNE, UFPR, Curitiba, 2017.

Aguiar, G. F.; Aguiar, B. C. X. C.; Wilhelm, V. E.; Wilhelm, H. M.; Silva, H. A. P. Investigation of Greatness that Impact on Power Transformer Useful Life. Journal of Innovative Technology and Education, v. 3, p. 147-157, 2016.

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.

Badune, J.; Vitolina, S.; Maskalonok, V. Methods for Predicting Remaining Service Life of Power Transformers and Their Components. Power and Electrical Engineering, vol. 31, 2013.

Bai, C.; Gao, W.; Liu, T. A Preliminary Study of Transformer Life Estimation Based on Linear Cumulative Damage Theory. International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 24, 2014.

Bassi, W.; Silva, H. A. P.; Grimoni, J. A. B.; Burani, G. F.; Galdeano, C. A.; Hossri, J. H. C. Moisture Assessment for Power Transformers Using PDC and Drying-out processes Evaluation. IEEE Sección México, 21a Reunión de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial, Acapulco, RVP-AI 2008.

Brand, K. P.; Brunner, C.; Wimmer, W. Design of IEC 61850 based substation automation systems according to customer requirements. CIGRÉ, Session B5-103, 2004.

Dominicis, C. M.; Ferrari, P.; Flammini, A.; Rinaldi, S.; e Quarantelli M. On the use of IEEE 1588 in Existing IEC 61850-based SASs: Current Behavior and Future Challenges. IEEE Transactions Instru., vol. 60, no. 9, pp. 3070–3081, 2011.

Gurjão, E. C.; Carmo, U. A.; Souza, B. A. Aspectos de Comunicação da Norma IEC 61850. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 2006.

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.

IEC 61850 – International Electrotechnical Commission. Draft Communication networks and Systems in substations. Part 7-1: Basic communication structure for substation and feeder equipments- Principles and models; IEC 61850-7-1. 2001.

IEC 61850 - International Electrotechnical Commission. Draft Communication networks and Systems in substations. Part 7-2: Basic communication structure for substation and feeder equipments- Abstract communication service interface (ACSI); IEC 61850-7-2. 2001.

IEC 61850 - International Electrotechnical Commission. Draft Communication networks and Systems in substations. Part 7-3: Basic communication structure for substation and feeder equipments- Common data classes; IEC 61850-7-3. 2001.

IEC 61850 - International Electrotechnical Commission. Final Draft International Standard (FDIS). Part 7-420: DER Logical Nodes. Communication Networks and Systems for power Utility Automation for Distributed Energy Resources (DER). 2009.

Kostic, T.; 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.

Kumar, A.; Rattan, J.; Sharma, R. N.; Chauhan, S. Investigation of Polarization and Depolarization Current for Evaluation of Moisture in Oil-Pressboard Insulation. International Journal of Computer and Electrical Engineering, vol. 3, n. 6, December, 2011

Lelekakis, N.; Martin, D.; Wijava, J. Ageing rate of paper insulation used in power transformers Part 1: Oil/paper system with low oxygen concentration. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, n. 6, 2012.

Lima, P. A. P.; Cabral, S. H. L. Computer simulation as an aid in the rating of a transformer on-load tap changer. IEE Electrical Insulation Magazine, v. 30, p. 34-38, 2014.

Lopes, Y. SmartFlow: Sistema Autoconfigurável para Redes de Telecomunicações IEC 61850 com arcabouço OpenFlow. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense-UFF, 2013.

Lopes, Y.; Franco, H. F.; Molano, D. A.; Santos, M. A.; Calhau, F. G.; Bastos, C. A. M.; Martins, J. S. B.; Fernandes, N. C. Smart Grid e IEC 61850: Novos Desafios em Redes e Telecomunicações para o Sistema Elétrico. Minicurso para o XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBRT, Brasília, DF, Setembro, 2012.

Machado, P. H. F. Metodologia de Modelagem CPN Aplicada a Análise de Desempenho de Sistemas de Comunicação baseados na Norma IEC 61850. Dissertação de Mestrado, PPGEE, Universidade Federal de Itajubá, MG, 2015.

Manczak, T.; Souza, F. A.; Rodrigues, T. X.; Marin, M. A.; Aguiar, G. F.; Wilhelm, V. E.; Wilhelm, H. M.; Garcia, D. A. A.; Silva, H. A. P.; Vidal, D. T. R. Implementação de Novos Grupos de Nós Lógicos (LN'S) Baseados na IEC 61850, Criando o Módulo de Diagnóstico da Degradação e o de Ações Corretivas para Aplicação em Sistemas de Gestão de Transformadores de Potência. XXIV SNPTEE, GMI 3, Curitiba, 2017.

Marques, A. P.; Moura, N. K.; Azevedo, C. H. B.; Santos, J. A. L.; Brito, L. C.; Guimarães, I. L. B.; Silva, T. H. V.; Ribeiro, C. J. Estudo sobre Transformadores de Potência: Parte I. 12º Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão – CONPEEX, UFG, Goiânia, 2015.

Mohagheghi, S.; Tournier, J. C. H.; Stoupis, J.; Guise, L.; Coste, T.; Andersen, C. A.; Dall, J. Applications of IEC 61850 in distribution automation. In: Proceedings of IEEE PES General Meeting, 2011.

Nascimento, C. C.; Buzzatti, M. G.; Trein, F. H.; Souza, L.; Netto, J.; Cechin, S. Desenvolvimento de uma Unidade de Aquisição e Controle e o uso da norma IEC 61850 com logical nodes específicos de geração para controle e supervisão de

usinas hidroelétricas. VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica-CITENEL, Costa do Saúpe, Bahia, 2015.

Nynas, N. Transformer Oil Handbook. 1° ed., Sweden: Linderoths in Vingaker, 223 p., 2004.

Paulino, M. E. C. Métodos de Diagnóstico para Avaliação de Isolamento e Determinação de Umidade em Transformadores. XIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Olinda, 2008.

Peternel, 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.

Ross, K. W.; Kurose, J. F. Redes de Computadores e a Internet: Uma Nova Abordagem. Pearson do Brasil, 3a edição, 2005.

Segatto, E. C.; Coury, D. V. Redes Neurais Aplicadas a Relés Diferenciais para Transformadores de Potência. Sba: Controle & Automação, vol. 19, n° 1, Natal, Mar. 2008.

Sidhu, T. S.; Kanabar, M. G.; Parikh, P. P. Implementation Issues with IEC 61850 Based Substation Automation Systems. Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC), IIT Bombay, 2008.

Silva, H. A. P.; Bassi, W.; Diogo, A. C. T. Noninvasive ageing assessment by means of polarization and depolarization currents analysis and its correlation with moisture content for power transformer life management. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, p. 611-616, Nov. 2004.

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.

Silva, H. A. P.; Wilhelm, H. M.; Vidal, D. T. R.; Marin, M. A. Determinação da Qualidade do Óleo Isolante de Transformadores Baseada na IEC 61620. II CMDT - Colóquio Sobre Materiais Dielétricos e Técnicas Emergentes de Ensaio e Diagnósticos (CE D1), Curitiba-PR, Setembro, 2016.

Silva, H. A. P.; Vidal, D. T. R.; Marin, M. A.; Briotto, A. M.; Lopes, R. C.; Vallenias, L. R. T. Implementação de Módulo de Medição Online para Avaliação da Qualidade do Óleo Isolante de OLTCS, Baseada na IEC 61620. XXIV SNPTEE, Curitiba, 2017.

Wilhelm, H. M.; Mattoso, M.; Piovezan, N.; Fernandes, P. O.; Mello, J. C. P.; Silva, C. A.; Hossri, J. H. C.; Galdeano, C. A.; Junior, M. M. S. Aplicação de peneira molecular na secagem da isolação sólida em transformadores de potência energizados. Revista Espaço Energia, n. 15, 2011.

**Recebido:** 23/03/2020

**Aprovado:** 15/08/2020

**DOI:** 10.3895/rts.v17n46.11824

**Como citar:** AGUIAR, G.F. et.al. Modelagem de novos nós lógicos baseados na IEC 61850 para aplicação em sistemas de gestão de transformadores de potência. **Rev. Technol. Soc.**, Curitiba, v. 17, n. 46, p.229-245, jan./mar., 2021. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/11824>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

**Direito autoral:** Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

