

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

SUBESTAÇÕES DE ENERGIA MODERNIZADAS E DIGITALIZADAS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA DA LITERATURA

**CESAR BIASI DE MOURA(1);EDUARDO LORENZETTI PELLINI(1);CARLOS AUGUSTO RODRIGUES(2);THIAGO FABRICIO ALAMINO(2);RAFAEL HERRERO ALONSO(1);JULIO CEZAR DE OLIVEIRA(3);MARCELO KNORICH ZUFFO(1)
ESCOLA POLITÉCNICA(1);ISA CTEEP(2);HITACHI ABB POWER GRIDS(3)**

RESUMO

O trabalho apresenta uma revisão integrativa de literatura, procurando determinar e quantificar, de maneira percentual e estatística, as principais informações sobre os ganhos proporcionados, dificuldades e desafios superados em projetos de digitalização de subestações de energia, conforme a norma IEC 61850. Dos 21 projetos levantados, 13 relataram as experiências com a modernização de 60 subestações de energia, 5 descreveram suas experiências com a digitalização em 5 subestações, com a utilização de TCs e TP's "convencionais", e por último, 3 projetos relataram as suas experiências com a digitalização em 4 subestações com a utilização de TCs e TP's ópticos.

PALAVRAS-CHAVE

IEC 61850; Subestação; Digitalização; Revisão Integrativa de Literatura

1.0 INTRODUÇÃO

Sistemas de proteção, controle e supervisão vem evoluindo desde o advento dos primeiros relés digitais e sistemas SCADA, sendo que, uma série de protocolos de comunicação como o DNP3, IEC 60870-5-103, MODBUS, etc., proporcionaram recursos e funcionalidades automatizadas, possibilitando a amostragem de dados em tempo real para a tomada de decisão, operação e controle de uma subestação de energia, indo além de controlar apenas equipamentos primários (Ex.: disjuntores, chaves seccionadoras, comutadores de tap de transformadores) (1). Entretanto, a utilização de uma variedade de protocolos dificulta e encarece os projetos de novas subestações e sua ampliação, pois, frequentemente os equipamentos dos vários fabricantes não operam entre si (interoperabilidade) e/ou mesmo duas gerações de equipamentos de um mesmo fabricante apresentam dificuldades de integração.

Com o surgimento da norma IEC 61850 em 2003, houve um aumento do poder de processamento, memória, funcionalidades e, de maneira expressiva, da capacidade de comunicação por meio de múltiplas interfaces, sendo descrita como uma arquitetura de comunicação única entre todos os dispositivos, independente da função que este exerce na subestação ou de seu fabricante (2), eliminando, teoricamente, os problemas de interoperabilidade existentes nas subestações convencionais baseadas na tecnologia dos protocolos listados anteriormente.

A IEC 61850 padroniza e estabelece arquiteturas de comunicação entre todos os dispositivos do pátio da subestação à sala de controle, fazendo com que as leituras dos parâmetros e grandezas elétricas, que antes eram enviadas por mecanismos mestre/escravo entre os relés digitais e controladores nas subestações, passassem a ser enviadas por meio conexões cliente/servidor, onde as informações provenientes dos IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) são referenciadas por metadados e não mais por endereços numéricos, sendo estes dispositivos o próximo nível de evolução tecnológica dos relés digitais de proteção.

Já a aquisição e digitalização dos sinais de correntes, tensões e outros parâmetros são realizadas por dispositivos instalados em campo, próximos aos equipamentos primários, denominadas unidades concentradoras ou mais comumente chamadas de MUs (*Merging Units*), que enviam estes valores, também em formato de metadados, do pátio da subestação à sala de controle por meio de uma rede Ethernet de fibras ópticas, levando a uma redução considerável de cabeamentos de cobre na subestação.

Com a introdução da IEC 61850, todos os fabricantes podem adequar seus produtos a protocolos de comunicação padronizados pela norma, possibilitando que dispositivos de fabricantes distintos possuam interoperabilidade, substituindo todos os protocolos listados anteriormente, acarretando em uma mudança de paradigma na implementação de novas subestações, alterando de maneira significativa a maneira como um projeto de proteção, automação e controle é desenvolvido, implementado e testado.

Levando-se em consideração todas estas características, as informações apresentadas em artigos e reportagens de relatos de implementações reais apresentam grande relevância para um melhor conhecimento dos ganhos proporcionados, dificuldades e desafios superados, nível de digitalização empregado, estatísticas sobre os principais fornecedores de equipamentos e etc.

Entretanto, através de um levantamento em uma das principais bases científicas (*Web of Science*) e nos anais do SNPTEE, não foram identificados trabalhos que realizaram uma revisão de literatura ou meta-análise dos principais dados, informações, resultados obtidos e grau de digitalização empregado nos projetos ou nos estudos de caso de subestações que empregam a arquitetura de comunicação da IEC 61850 de maneira parcial, ou na sua totalidade e extensão, em todos os níveis hierárquicos da subestação.

Desta forma, este trabalho tem por objetivo a realização de uma revisão integrativa de literatura sobre estudos de caso (nacionais e internacionais) de digitalização de subestações de energia, conforme a norma IEC 61850, permitindo, observar, avaliar e reunir informações sobre os ganhos proporcionados, dificuldades e desafios superados, grau de digitalização empregado, estatísticas sobre os principais fornecedores de equipamentos e etc., sendo possível, desta maneira, realizar uma análise quantitativa dos principais resultados que os "clientes" (Empresas de Geração, Transmissão e Distribuição) buscam e vem obtendo no escopo destes projetos.

2.0 HIERARQUIA E EVOLUÇÃO DO NÍVEL DE AUTOMAÇÃO EM SUBESTAÇÕES

O processo de automatização de subestações de energia vem sendo realizado com sucesso desde a década de 1970 (2), (3), sendo que até o ano de 2003 há relatos de mais de 4000 sistemas e subestações automatizadas ao redor do mundo (4), fornecendo canais de comunicação entre os sistemas nas subestações e centros de controle. Com o advento da norma IEC 61850, em 2003, foi introduzido um novo padrão para a comunicação entre os dispositivos de alta tensão e os IEDs, o chamado barramento de processo, detalhado na seção 9-2 da norma, além de propostas para a arquitetura de comunicação. O barramento de processo possui elevados requisitos de largura de banda, pois é utilizado para transferir os valores amostrados de maneira contínua dos equipamentos do nível de processo (2). Ambos os barramentos, de estação e de processo, são implementados através de redes LAN (*Local Area Network*) em *gateways* e *switchs* de dados com requisitos adequados para esta função.

Os equipamentos de uma subestação, em geral, são categorizados em equipamentos primários, como transformadores de potência, disjuntores de desconexão (DCBs), chaves seccionadoras, transformadores de instrumentação (TCs e TPs), etc. e em equipamentos secundários, como os equipamentos de proteção, controle e comunicação. Tanto uma subestação convencional, quanto uma subestação modernizada ou digitalizada conforme a IEC 61850, podem ser divididas em três diferentes níveis (Figura 1), sendo eles o nível da estação (*station level*), o nível de vão, ou conhecido também como nível de *bay* (*bay level*), e o nível do processo elétrico (*process level*) (2). O nível da estação é onde são instalados os equipamentos que são comuns aos diversos níveis, como as IHMs (Interface Homem Máquina), os servidores SCADA, de armazenamento de dados, os *gateways* (conversores de protocolo), interfaces para comunicação remota e onde o controle e a supervisão são realizados.

Já o nível de *bay* é onde estão situados os dispositivos que executam as funções de proteção e comando na distribuição de energia, sejam eles eletromecânicos, eletrônicos, as primeiras gerações de dispositivos digitais (subestação convencional) ou os IEDs. É o nível que realiza a interface com o nível de processo (correntes, tensões, temperaturas, estado dos equipamentos de manobra, alarmes, etc.).

Por último, o nível de processo é onde se encontram os sensores e atuadores que são necessários para monitorar e operar os equipamentos diretamente responsáveis pela transferência de energia, como por exemplo, disjuntores, seccionadoras e transformadores. Dentro desse nível estão os *bays* convencionais com painéis isolados a ar (subestação convencional ou modernizada), DCBs, TCs, TPs, etc.

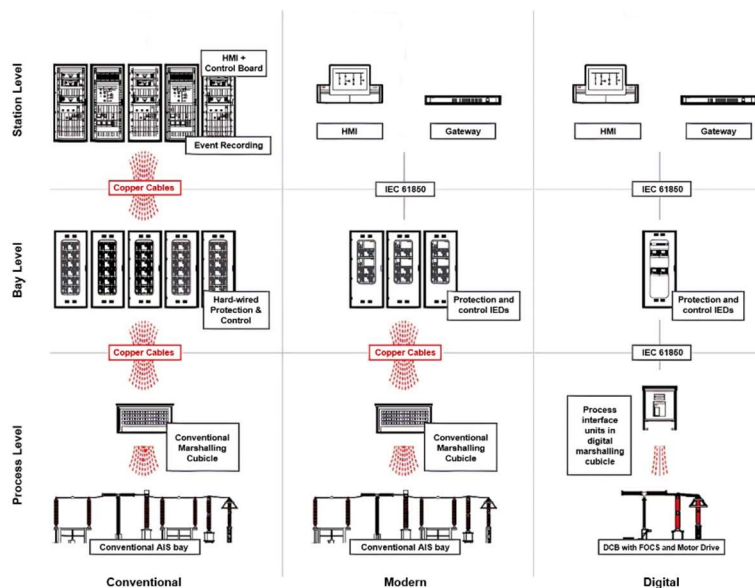


Figura 1 – Principais níveis de separação e evolução dos equipamentos secundários de subestações (3), (5).

Os equipamentos do nível de estação se comunicam com os equipamentos de nível de *bay* por meio do barramento da estação, enquanto os equipamentos de nível de *bay* se comunicam com os equipamentos do nível do processo através do barramento de processo.

Diferentemente de uma subestação convencional que utiliza IEDs microprocessados, mas não implementa nenhum dos barramentos de dados previstos na IEC 61850, ou de uma subestação digitalizada onde os são implementados os barramentos de estação e de processo, em uma subestação modernizada, é implementado apenas o barramento de estação, sendo que, a comunicação entre os IEDs e os sensores e atuadores necessários para monitorar e operar os equipamentos responsáveis pela transferência de energia continua a ser realizada por cabeamentos de cobre, assim como numa subestação convencional, Figura 1.

As subestações modernizadas podem ser avaliadas como uma evolução tecnológica (*retrofit*) natural das subestações convencionais, para os projetos em que não há viabilidade técnica ou econômica para substituição ou modernização dos equipamentos primários e secundários do nível de processo, mas que é capaz de inserir estas subestações no contexto da IEC 61850. Apesar de não utilizar a totalidade dos recursos previstos na norma, a modernização é capaz de proporcionar ganhos na confiabilidade, capacidade de processamento e novas funções de controle e diagnóstico automáticos, além da redução, em parte, dos custos com operação e manutenção (O&M), e de possibilitar que estas subestações sejam interligadas a um centro de controle, permitindo o seu monitoramento, operação e intervenção de maneira remota.

As primeiras subestações implantadas contavam com painéis isolados a ar (AIS). Com o advento dos cubículos isolados a gás (GIS), o espaço ocupado por este tipo de subestações pôde ser reduzido em cerca de 60%, alojando todos os condutores primários em tubos de alumínio isolados com gás SF₆ e devidamente aterrados (2).

Para equipamentos primários, isso significa que os transformadores de instrumentos de alta potência (HPIT), ou “convencionais” (CIT), que usam cobre, ferro, materiais de isolamento e com saídas analógicas, podem ser substituídos pelos transformadores de instrumentos de baixa potência (LPIT), os “não convencionais” (NCIT), interligados ao barramento de processo através de cabos de fibra óptica. Devido ao aumento gradual da utilização de sensores, torna-se necessário a adoção de equipamentos de interface, como as MUs, capazes de suportar HPITs e LPITs durante esse período de transição. Esse requisito é importante quando são realizadas obras de atualização e expansão de subestações, uma vez que os novos *bays* conterão LPITs e os *bays* existentes conterão HPITs.

Com a introdução do barramento de processo nas subestações digitalizadas, ocorrerá uma redução considerável no cabeamento dos equipamentos secundários, tendo como consequência a redução de custos com cabos e de seus equipamentos associados, como valas, calhas e eletrodutos para cabos condutores e seu material de instalação, sendo utilizadas poucas fibras ópticas ao invés de toneladas de cabos de cobre (2).

3.0 METODOLOGIA

O método de pesquisa consiste em uma busca por estudos relevantes sobre um determinado assunto, a partir de procedimentos recomendados para elaboração de uma revisão integrativa da literatura, a qual tem como finalidade reunir e resumir o conhecimento técnico-científico já produzido sobre o tema investigado, permitindo compilar, avaliar e sintetizar as evidências disponíveis para contribuir com o desenvolvimento do conhecimento na temática (6), através da inclusão simultânea de artigos científicos e outros materiais técnicos como revistas especializadas do

setor, reportagens em sites de fabricantes e/ou projetos de pesquisa e estudos de casos relatados em catálogos técnicos de fornecedores de equipamentos, a fim de obter uma plena compreensão do fenômeno em estudo (7). Este método de pesquisa possibilita a avaliação crítica e a síntese de evidências disponíveis sobre o tema investigado, reduzindo incertezas, permitindo generalizações precisas sobre o fenômeno a partir das informações disponíveis, facilitando a tomada de decisões com um melhor embasamento através das experiências (6), (8).

A revisão integrativa obedece às seguintes fases (8):

- a) identificação do tema e formulação da questão da pesquisa;
- b) estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão dos estudos para amostragem;
- c) categorização dos estudos e definição das informações a serem extraídas;
- d) avaliação crítica dos estudos selecionados para a revisão integrativa;
- e) interpretação dos resultados;
- f) apresentação da revisão e síntese do conhecimento.

Para guiar a presente revisão integrativa, formulou-se a seguinte questão de pesquisa:

“Quais são os principais ganhos proporcionados, dificuldades e desafios superados, nível de digitalização empregado, estatísticas sobre os principais fornecedores de equipamentos em projetos de digitalização de subestações de energia, conforme a norma IEC 61850?”

A busca na literatura foi realizada nas seguintes bases de dados: anais do SNPTEE e *Web of Science*, a fim de identificar publicações dos últimos 10 anos (2011 a 2021), nos idiomas inglês e português.

Foram também pesquisados anais de congressos, revistas especializadas, reportagens em sites, projetos de pesquisa e estudos de casos relatados por fabricantes de equipamentos, a fim de obter uma plena compreensão sobre a questão de pesquisa, por meio de buscas realizadas através de palavras-chaves no buscador Google.

A revisão foi conduzida com pesquisas nas bases de dados selecionadas e buscadores, utilizando palavras-chave como "IEC 61850"; "MODERNIZAÇÃO"; "DIGITALIZAÇÃO"; "SUBESTAÇÃO" (português) e "MODERNIZATION"; "DIGITALIZATION"; "SUBSTATION" (inglês), além dos operadores booleanos do tipo "AND" e "OR".

Por consequência desse processo, as seguintes *strings* de busca foram desenvolvidas para as bases de dados anais do SNPTEE e *Web of Science*, respectivamente:

- SNPTEE
("IEC 61850" OR "IEC61850" OR "MODERNIZAÇÃO" OR "MODERNIZAÇÕES" OR "DIGITALIZAÇÃO" OR "DIGITALIZAÇÕES") AND ("SUBESTAÇÃO" OR "SUBESTAÇÕES")
- *Web of Science*
TS=(("IEC 61850"OR"IEC61850"OR"MODERNIZATION"OR"DIGITALIZATION")AND("SUBSTATION"OR"POWER SUBSTATION"OR"ENERGY SUBSTATION"))AND("CASE"OR"PROJECT PILOT"OR"IMPLEMENTATION"))

Como o SNPTEE não dispõe, até o presente momento, de um sistema capaz de realizar buscas formadas pelo encadeamento de palavras-chave com operadores booleanos, a seleção dos artigos para esta análise foi realizada através da busca das palavras-chaves listadas na respectiva *string* de busca no título do artigo, sendo pré-selecionados aqueles que apresentassem ao menos uma das palavras-chaves contidas em cada um dos dois blocos de palavras separados pelo operador booleano "AND". Após isso, todos os artigos pré-selecionados foram checados para a existência de outra palavra-chave, do bloco de palavras que não foram localizados no título do artigo, para determinar sua seleção para o estudo.

Com relação a base *Web of Science*, foram analisados somente os artigos das áreas "*Engineering*", "*Energy Fuels*" e "*Automation Control Systems*", de modo a remover da busca materiais técnicos e artigos de áreas correlatas, mas não correspondentes a questão de pesquisa, aplicando este filtro após a busca pela *string*. Em seguida, esses estudos selecionados foram submetidos a dois outros procedimentos de categorização: o primeiro corresponde à leitura do título, palavras-chave e resumo, enquanto o segundo envolve a leitura do artigo completo (Figura 2).

Como critério de inclusão para o estudo, delimitaram-se apenas artigos do período mencionado e que respondessem ao menos um dos tópicos abordados na questão de pesquisa, com textos completos e disponíveis online. Já para os critérios de exclusão definiu-se descartar: artigos e estudos sobre temas específicos, que não abordavam as experiências e informações sobre projetos de modernização e digitalização de subestações com a IEC 61850.

Pontua-se ainda que os artigos encontrados em mais de uma base de dados foram contabilizados apenas uma vez. Ao final, foi contabilizado um número de 49 artigos e outros materiais, sendo que após a clivagem, excluíram-se 24 trabalhos (Figura 2).

No processo de análise foram coletados dados referentes ao periódico, autores e ao estudo (principais ganhos proporcionados, dificuldades e desafios superados, nível de digitalização, principais fornecedores e etc.)

A interpretação dos dados foi fundamentada nos resultados da avaliação criteriosa dos artigos selecionados. Foi realizada a comparação com o conhecimento teórico, identificação de conclusões e implicações resultantes da revisão integrativa. Após a avaliação crítica, obteve-se uma amostra final de 25 estudos (Figura 2).

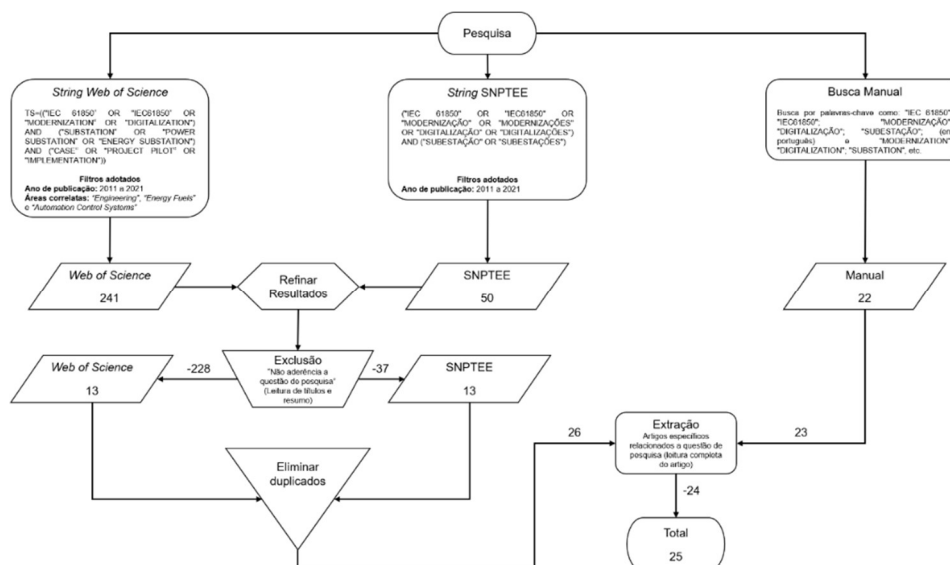


Figura 2 – Fluxograma do processo de seleção dos artigos e outros materiais.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o advento da IEC 61850 notou-se um vasto número de estudos publicados, pois ela emergiu de maneira desafiadora, trazendo novos temas de interesse para pesquisa, como a segurança cibernética, arquiteturas de redes de comunicação, descrição automática e interoperabilidade de equipamentos, etc., necessitando da contribuição mútua de várias outras áreas do conhecimento.

Entretanto, estudos, reportagens em revistas especializadas, relatos técnicos e artigos científicos sobre os relatos de implementação da arquitetura de comunicação IEC 61850 em subestações de energia ainda são escassos, concentrando-se principalmente em artigos de congressos científicos (36%), artigos publicados em revistas científicas (*journals*) (8%) e em relatos em sites e catálogos técnicos de fabricantes de equipamentos (28%), dos 25 estudos selecionados (8%) dos 313 avaliados.

Tabela 1 – Localização, digitalização, tecnologia de TC/TPs adotada, principais fornecedores e quantidade de SEs.

Localização	n°SEs	Nível Digit.	Tecnologia	Fornecedores	Bibliografia
Shandong (China)	1	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	Indeterminado;	(9), (10)
Dombarton (Austrália)	1	Digitalização	TC/TP cobre (HPITs)	GE; NR Electric;	(11)
São Paulo (Brasil)	1	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	Indeterminado;	(12)
Palhoça (Brasil)	1	Digitalização	TC/TP cobre (HPITs)	Alstom; Reason;	(13)
El Juile; Manuel Torres (México)	2	Digitalização	TC óptico (LPITs)/ TP cobre (HPITs)	ABB; Areva; Artech; GE; Schneider Electric; SEL;	(14)
Guarujá (Brasil)	30	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	SEL;	(15), (16)
São Gonçalo (Brasil)	1	Digitalização	TC/TP cobre (HPITs)	ABB;	(17)
Kintampo (Gana)	1	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	Indeterminado;	(18)
Lisboa (Portugal)	1	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	Indeterminado;	(19)
Xangri-lá, Gravataí; Osório (Brasil)	3	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	ABB;	(2)
Sils (Suíça)	1	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	ABB;	(2)
Laufenburg (Suíça)	1	Digitalização	TC/TP cobre (HPITs)	ABB;	(2), (20)
Lagoaça (Portugal)	1	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	ABB; Advantech; KVM; Meinberg; Ruggedcom; Sycomp;	(2)
Division No. 22 (Canadá)	1	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	ABB; Areva; Siemens;	(2)
Araucária (Brasil)	1	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	ABB;	(21)
Doha (Qatar)	1	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	ABB;	(22), (23)
Nairóbi (Quênia)	17	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	ABB;	(22), (24)
Moscou (Rússia)	1	Modernização	TC/TP cobre (HPITs)	ABB;	(22), (25)
Malerkotla (Índia)	1	Digitalização	TC óptico (LPITs)/ TP cobre (HPITs)	Indeterminado;	(26)
Wishaw (Reino Unido)	1	Digitalização	TC/TP óptico (LPITs)	ABB; GE; Omicron; Synaptic;	(27), (28), (29)
Surgut (Rússia)	1	Digitalização	TC/TP cobre (HPITs)	LYSIS LLC;	(30)

Quanto ao ano de publicação dos estudos levantados, verificou-se uma distribuição relativamente uniforme (entre 4% a 8%) para o período de 2003 a 2020, havendo um pico de publicações no ano de 2015 (28%).

Dos 25 estudos da pesquisa bibliográfica, 12% foram encontrados na base de dados *Web of Science*, 16% nos anais do SNPTEE e os demais estudos (72%) foram localizados através de buscas manuais, subdivididos em 20% de

artigos científicos, 28% de relatos em sites e catálogos técnicos de fabricantes de equipamentos, 4% de teses de mestrado; 8% de relatórios técnicos e 12% de revistas e reportagens técnicas.

Da leitura e análise das publicações, ascenderam quatro núcleos temáticos: Núcleo 1: Distribuição da localização das subestações ao redor do mundo; Núcleo 2: *Marketshare* dos principais fornecedores; Núcleo 3: Nível de digitalização empregado e adoção de LPITs; e Núcleo 4: Principais ganhos e benefícios relatados na modernização/digitalização das subestações.

4.1 Núcleo 1: Distribuição da localização das subestações ao redor do mundo

A distribuição da localização dos 21 projetos de modernização e digitalização que implementaram a arquitetura de comunicação IEC 61850, levantados na Tabela 1, são apresentados nas Figura 3(a) e Figura 3(b), respectivamente. Nelas é possível observar valores próximos entre a proporção de projetos de modernização e digitalização para os continentes europeu, asiático e americano.

O Brasil responde 31% dos projetos de modernização e 25% dos projetos de digitalização dos estudos levantados, contra 8% dos projetos de modernização e 13% de digitalização nos demais países do continente americano.

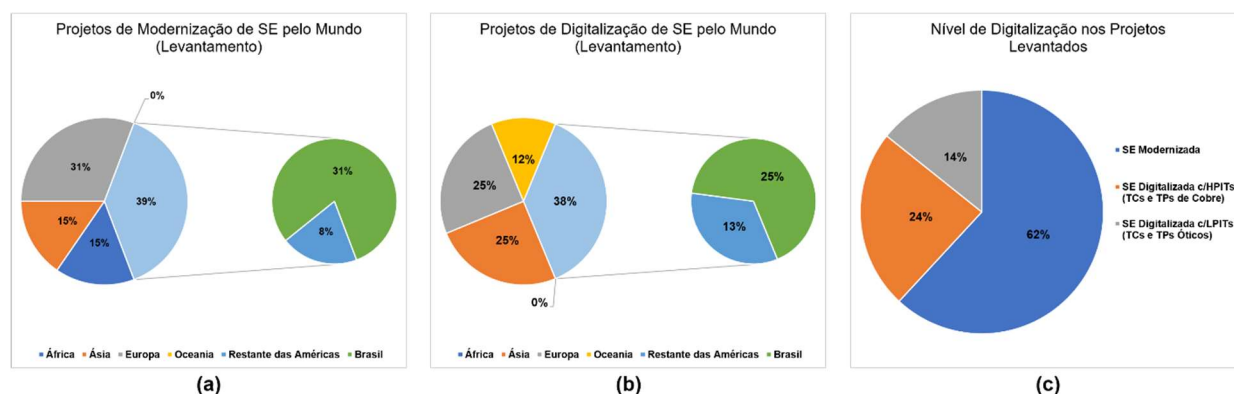


Figura 3 – (a) Proporção SEs modernizadas; (b) Proporção SEs digitalizadas; (c) Proporção nível de digitalização.

4.2 Núcleo 2: *Marketshare* dos principais fornecedores

Quanto ao *marketshare* dos principais fornecedores para os 21 projetos levantados na Tabela 1, a Figura 4(a) apresenta os percentuais para todos os níveis de digitalização, enquanto os *marketshares* específicos são apresentados nas Figura 4(b) e Figura 4(c) respectivamente, destacando-se a ABB e GE como fornecedores capazes de oferecer soluções relacionadas com a tecnologia dos barramentos de estação e de processo.

A ABB já possui instalações comerciais, utilizando TCs e TP de alta potência (HPITs) e de baixa potência (LPITs), além de equipamentos do barramento de processo. Anteriormente, desenvolveu vários projetos piloto, sendo o primeiro realizado em 2004, garantindo resultados positivos nos estudos realizados em subestações (32).

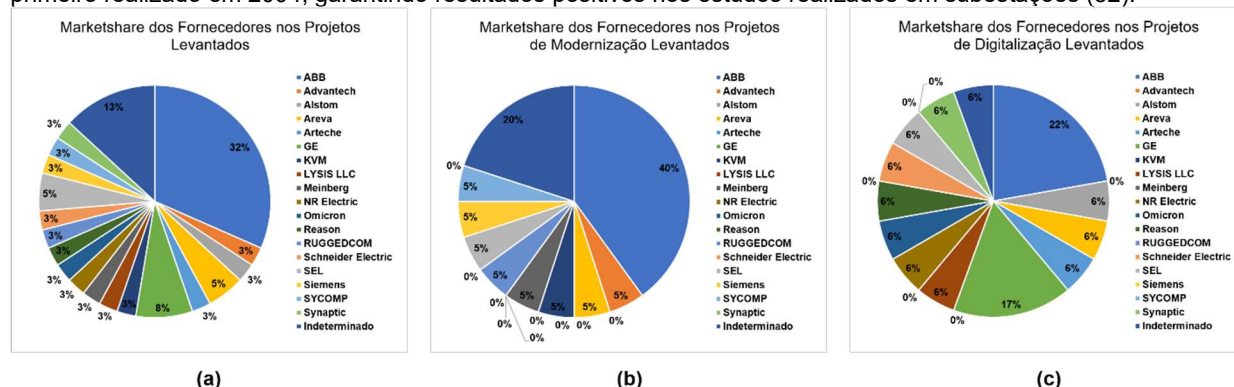


Figura 4 – *Marketshare* dos fornecedores dos: (a) Total de projetos levantados; (b) Projetos de modernização levantados; (c) Projetos de digitalização levantados.

Quanto a GE verificou-se durante a revisão que ela desenvolveu dois projetos para testar o funcionamento do barramento de processo de seus equipamentos, com foco na questão da interoperabilidade, tendo uma abordagem diferente dos restantes dos demais fabricantes quanto a arquitetura. A arquitetura, ao invés de ser constituída por uma rede em anel, utiliza ligações ponto a ponto, entre as MUs e os IEDs, passando por um painel de ligação intermediário permitindo, segundo o fabricante, a economia de até 50% da mão de obra referente à instalação de um sistema de proteção e controle de uma subestação digitalizada (32).

Já a Alstom apresenta uma solução completa, com praticamente todos os componentes necessários à implementação de uma solução de barramento de processo, numa solução integrada denominada *DS Agile*, podendo ser integradas com HPITs ou LPITs disponíveis (32).

4.3 Núcleo 3: Nível de digitalização empregado e adoção de LPITs

Conforme a Figura 3(c) é possível observar que dos 21 projetos/estudos levantados, 62% trataram da modernização de subestações, 24% da digitalização com HPITs e 14% da digitalização com o uso de TCs, TP's ou ambos LPITs. Através do levantamento, os estudos de subestações digitalizadas com adoção de LPITs, deram enfoque ou na experiência de utilização (14), (27), (28), (29) ou ao desenvolvimento de TCs do tipo LPIT (26), conhecidos também como “não convencionais”, dentro do escopo de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D), sendo que o único estudo que relatou a utilização de TP's de baixa potência foi o da subestação de Wishaw, no projeto FITNESS. O estudo (14) relatou que um dos maiores desafios na utilização tecnologia de TCs de baixa potência ópticos é a interface com o sistema de proteção e a capacidade do transformador de medida fornecer estes dados para os equipamentos secundários, sendo esta questão resolvida através da utilização de interfaces digitais normatizadas conforme a IEC 61850-9-2.

Os resultados dos testes comparativos entre fornecedores distintos observados em (14) apresentaram uma diferença de fase entre os dois conjuntos de LPITs ópticos de 2,7ms, sendo que o TC de baixa potência de um dos fabricantes avaliados apresentou uma quantidade consideravelmente maior de ruído em relação ao do outro fabricante.

O principal ganho descrito no estudo foi a eliminação dos riscos de explosões de TCs, pois a empresa responsável pelo estudo relatou mais de 200 explosões de TCs “convencionais” (HPITs) nos últimos 10 anos, tendo sido avaliados TCs ópticos (LPITs) da ABB na subestação de El Juile e da Areva e Artech na subestação de Manuel Torres (14).

4.4 Núcleo 4: Principais ganhos e benefícios relatados na modernização/digitalização das subestações

Os principais ganhos ou benefícios relatados nos estudos levantados foi a economia de cabos e materiais (57%); redução de custos (29%); avaliação de interoperabilidade com múltiplos fornecedores (29%); redução de prazos de instalação, comissionamento e O&M (29%).

Todos os estudos levantados relataram ter obtido ao menos um ganho ou benefício, sendo a frequência de menções relatadas nos estudos mostrada no gráfico de barras da cor azul e a frequência de menções, ponderada pelo volume de subestações, mostrada no gráfico de barras da cor laranja, da Figura 5.

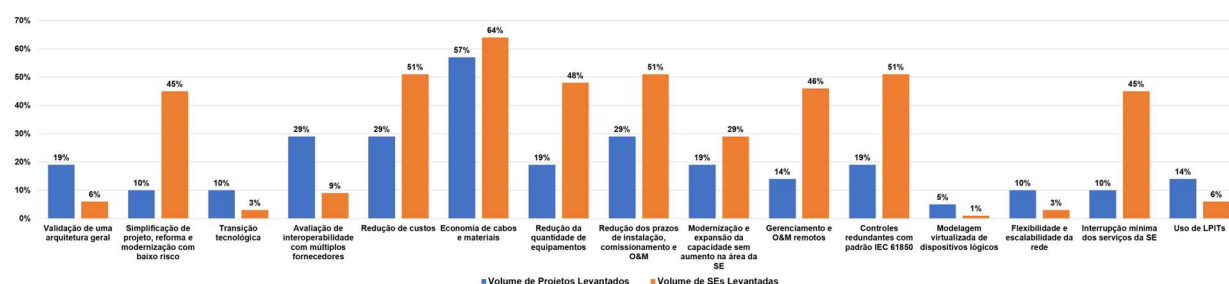


Figura 5 – Frequência de menções dos principais ganhos e benefícios relatados por volume de projetos e por volume de subestações levantadas.

Tabela 2 – Redução/economia obtidos para os principais ganhos e benefícios relatados nos estudos.

Principais ganhos e benefícios relatados	SE Modernizada				SE Digitalizada c/HPITs	SE Digitalizada c/LPITs
	(11)	(12)	(15), (16)	(18)	(11)	(11)
Redução de custos	2%	-	30%	-	11%	9%
Economia de cabos e materiais	40%	50%	30%	50%	93%	93%
Redução da quantidade de equipamentos	7%	50%	40%	-	47%	30%
Redução dos prazos de instalação, comissionamento e O&M	-	30%	40%	-	-	-

Conforme os dados levantados e apresentados na Tabela 2, é possível esperar uma economia de cabos e materiais entre 30% até 50% nos projetos de modernização de subestações, podendo chegar até 93% quando se trata de projetos de digitalização, independentemente do tipo de transformadores de instrumentação utilizado no projeto.

No estudo (11) foi observado uma redução de custos de apenas 2% para subestações modernizadas, 11% para as digitalizadas com HPITs e 9% para as digitalizadas com LPITs, para custos com projeto, obras/instalação e comissionamento. Quanto a redução nos custos de O&M, os estudos (15), (16) relataram uma redução de 30%.

Quanto a redução da quantidade de equipamentos, foi observado uma redução entre 7% até 50% nos projetos de modernização, 47% nos projetos de digitalização com HPITs e de 30% para os projetos com LPITs.

A grande faixa observada no levantamento para os valores de redução da quantidade de equipamentos pode ser atribuída, em parte, às diferenças no tamanho/porte da subestação avaliada no estudo, às diferenças nas arquiteturas empregadas e às características específicas das famílias de equipamentos utilizados, sendo que no Brasil foi observada uma redução na quantidade de equipamentos em projetos de modernização entre 40% a 50%.

Já no Brasil, distribuidoras de energia vem observando uma redução dos prazos de instalação, comissionamento e O&M da ordem de 30% a 40% (12), (15), (16), além de uma redução de 40% de tempo na fase de projeto (15), (16). Quanto a questão da interoperabilidade com múltiplos fornecedores, o trabalho (31) realizou testes de interoperabilidade no barramento de processo, focados em testes de mensagens SV, comunicação GOOSE e redundância de comunicação, comparando a interoperabilidade de MUs ABB, GE e Siemens operando em pares na mesma rede, ficando evidenciando a interoperabilidade dos equipamentos entre os três fabricantes, apesar de ficar claro a necessidade de uma ferramenta de integração apropriada.

Já o trabalho (32) descreveu uma comparação a interoperabilidade dos equipamentos do nível de processo, como as MUs de cada um dos fabricantes, com os equipamentos e painéis isolados a ar (AIS) de uma subestação de pátio exterior, baseado numa avaliação realizada pela EDP Distribuição Portugal. Utilizando-se o método de comparação sistemática entre critérios, foi ranqueado a solução da ABB como a que apresenta a melhor interoperabilidade, seguida pela GE e por último as soluções da Alstom e Siemens.

5.0 CONCLUSÕES

Diante dos diferentes objetivos e ganhos relatados com relação a digitalização nos estudos levantados, observada a prevalência de casos de modernização, uma mesma conclusão converge entre todos os autores: a escolha da arquitetura do sistema é parte fundamental para atingir os objetivos esperados, levando-se em consideração a importância da qualificação das equipes de engenharia e O&M em digitalização de subestações utilizando a IEC 61850, incluindo o barramento de processo, além de procurar adequar os procedimentos internos nas empresas.

A prevalência de projetos de modernização nos estudos levantados pode ser explicada, em parte, pelo fato de não ter sido aplicado um critério de exclusão com base no mesmo período de publicação adotado nas buscas das bases do *Web of Science* e *SNPTTE* (10 anos). Outra razão para esse fenômeno foi a dificuldade histórica para implementação dos primeiros barramentos de processos, sendo que o primeiro relato experimental obtido nesta revisão integrativa ocorreu no ano de 2009, na subestação de Laufenburg, Suíça, implementado pela ABB (2), (20). Considerando o exposto anteriormente, é possível explicar a concentração, no levantamento bibliográfico, de projetos de modernização entre os anos de 2006 a 2015 e dos projetos de digitalização entre os anos de 2015 a atualmente. Até o presente momento, subestações digitalizadas que utilizam LPITs para substituição de TCs e TP's de alta potência ("convencionais") aparecem como casos restritos nos estudos levantados (14%), muitas vezes dentro do escopo de projetos de P&D, como no caso das subestações Malerkotla (26) e Wishaw (27), (28), (29), apesar de haver soluções comerciais (32) de TCs de baixa potência ("não convencionais"), fabricados pela ABB, Alstom, Areva e Arteche (norma IEC 60044-8) e de TP's de baixa potência fabricados pela ABB e Alstom (norma IEC 60044-7).

Já a questão da interoperabilidade vem evoluindo com o tempo, mas ainda deve ser observada atentamente quando esta característica for um requisito essencial de um projeto de digitalização, (2), (26), (27), (28), (29), (31), (32), sendo que os testes realizados em laboratório possuem um papel fundamental para atingir, com sucesso, este objetivo (31). Quanto à decisão entre realizar a modernização, a digitalização com HPITs ou a digitalização com LPITs, de uma subestação de energia, a opção que apresentou o melhor custo benefício foi a da digitalização com HPITs (Tabela 2), com uma economia de custos de 11%, redução de cabos de cobre de 93% e uma redução de 47% dos painéis e armários da sala de controle e do pátio da subestação (11). Entretanto isto não deve ser considerado uma regra a ser seguida, pois o potencial de ganhos obtidos para cada grau de digitalização empregado, depende de fatores como: condições comerciais de fornecimento, arquitetura e tecnologia empregados pelo fornecedor selecionado, tamanho da subestação, tempo de vida útil previsto para os equipamentos do pátio, previsão de aumento futuro da demanda de energia, impossibilidade de expansão da área da subestação, etc., devendo essas variáveis serem calculadas caso a caso, tendo-se como base o que foi levantado nesta revisão integrativa de literatura.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) FRONTIN, S. Equipamentos de alta tensão: Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. 1. ed. Rio de Janeiro, 2014.
- (2) ABB. ABB Review – Special Report IEC 61850, 2010.
- (3) BRAND, K. P., LOHMANN, V., WIMMER, W. Substation Automation Handbook, UAC 2003, 2003.
- (4) KRUIJMER, B. Substation Automation – Historical Overview IEC 61850 Seminar, KEMA, Amsterdam, August 2003.
- (5) ABB. POWER GRIDS: We are bridging the gap - Enabling Digital Substations, 2018.
- (6) MOWBRAY, P. K., WILKINSON, A., TSE, H. H., An integrative review of employee voice: Identifying a common conceptualization and research agenda. *Rev International Journal of Management Reviews*, 2015.
- (7) WHITTEMORE, R., KNAFL, K., The integrative review: updated methodology. *J Adv Nurs*, p. 546-553, 2005.

- (8) BOTELHO, L. L. R., CUNHA, C. C. A.; MACEDO, M., O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. *Gestão e Sociedade*. Belo Horizonte, v. 5, n. 11, p. 121-136, 2011.
 - (9) CHENG, X., LEE, W., PAN, X., Electrical substation automation system modernization through the adoption of IEC61850. *IEEE/IAS 51st I&CPS*, p. 1-7, 2015.
 - (10) CHENG, X., LEE, W., PAN, X., Modernizing Substation Automation Systems: Adopting IEC Standard 61850 for Modeling and Communication. *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 23, n. 1, p. 42-49, 2017.
 - (11) HINKLEY, K., MISTRY, C., First digital substation in TransGrid – Australia: a journey, business case, lessons. *The Journal of Engineering*, p. 1135-1139, 2018.
 - (12) CAMARGO, J. M., VAROLO, D., NUNES, E., Metodologia de comissionamento do sistema de controle, proteção e automação que aplica a norma IEC 61850 para subestações em operação. XXI SNPTEE, Florianópolis, SC, 2011.
 - (13) FLORES, P. H., et. al., Preparando o futuro: Projeto piloto de barramento de processo (IEC61850-9-2) merging unit e relé de proteção na subestação de palhoça 138 kV da Eletrosul. XXIII SNPTEE, Foz do Iguaçu, PR, 2015.
 - (14) CARVALHEIRA, E., ROMÁN, C. M., Experiências da implementação e comissionamento de um esquema de proteção com TC's ópticos e barramento de processo IEC 61850-9-2 em uma linha de 400 kV da CFE México. XXIII SNPTEE, Foz do Iguaçu, PR, 2015.
 - (15) KIMURA, S., Experiência da Elektro na digitalização de subestações utilizando a norma IEC 61850. VIII SIMPASE, Rio de Janeiro, RJ, 2009.
 - (16) KIMURA, S., et. al., Aplicação do IEC 61850 no mundo real: Projeto de modernização de 30 subestações elétricas. 1st Annual Protection, Automation and Control World Conference 2010, Irlanda, (Tradução) 2017.
 - (17) OLIVEIRA, J. C., ARCON, A. B., Uso do barramento de processo na primeira subestação digital em 500 kV do mundo - Enel São Gonçalo – no estado da arte da norma IEC 61850. XXV SNPTEE, Belo Horizonte, MG, 2019.
 - (18) ANDERSON, C. E., Case study: IEC 61850 application for a transmission substation in Ghana. PAC World Africa Conference, Cidade do Cabo, África do Sul, 2013.
 - (19) CARRAPATOSO, A., et. al., Integra project – Applying IEC 61850 technology. CIGRÉ, Paris, França, 2006.
 - (20) ABB. ABB's first IEC 61850-based Substation Automation solution in successful operation, 2005.
 - (21) ABB. Petrobras lowers lifecycle costs with System 800xA and IEC 61850, 2008.
 - (22) ABB. We keep you competitive Power Grid Automation Center Trutnov, Czech Republic, 2015.
 - (23) TRADE ARABIA. ABB wins Qatar substation order, 23 Fev. 2011.
 - (24) ABB. ABB to reinforce transmission grid and improve power reliability in Kenya, 09 Fev. 2015.
 - (25) ABB. Project Reference 9-4 – ABB maximizes the benefits of IEC 61850 for customers around the globe, 2009.
 - (26) CHAUHAN, R. K.; De Bhowmick, B. N.; Rao; S. B. R.; Awasthi, C. P. India's First 400-kV Fully Digital Substation, *T&D World Magazine*, 10. Jun. 2020.
 - (27) MOHAPATRA, P. et al. FITNESS Paving the way forward for GB's digital substation journey, *PAC World Magazine*, Set. 2018.
 - (28) ABB. FITNESS lays the foundations for digital substations, 06 Nov. 2019.
 - (29) SPEN. Future Intelligent Transmission NETwork SubStation (FITNESS), RIIO NIC, 2015.
 - (30) RATAN, D., et al. RATAN, D., KANABAR, M., Centralized Substation Protection and Control. Report of Working Group - K15 of the Substation Protection Subcommittee, IEEE PES Power System Relaying Committee, 2015.
 - (31) ROSERO, O. A. T. R., et. al., Pruebas de interoperabilidad para proyecto piloto en bus de proceso multifabricante según IEC 61850-9-2. V Congreso CIER de la energía, Medellín, Colômbia, 2017.
 - (32) TEIXEIRA, A. G. Q. M., Avaliação da utilização do IEC 61850 process bus no projecto tipo de SEs da EDPD. Dissertação de mestrado. Universidade do Porto, Cidade do Porto, Portugal, 2013.
- DADOS BIOGRÁFICOS



Cesar Biasi de Moura, é aluno de mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (USP), Brasil, com bacharelado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2011). Atualmente atua como pesquisador e Engenheiro de Sistemas em projetos relacionados à Energia Solar Fotovoltaica no Laboratório de Sistemas Integrados da Universidade de São Paulo (LSI-USP) e no Laboratório de Sistemas Integráveis Tecnológico (LSI-TEC), uma ICT privada com origens na Escola Politécnica da USP. Possui experiência na área de Engenharia Elétrica tendo atuado em projetos de pesquisa nas áreas de Energia Solar Fotovoltaica, Cogeração Heliotérmica para Microgeração e Sistemas Embarcados.

- (2) **EDUARDO LORENZETTI PELLINI**
Possui graduação (2000), mestrado (2005) e doutorado (2010) em Engenharia Elétrica - Sistemas de Potência - pela Escola Politécnica (EP) da Universidade de São Paulo (USP). Atualmente é Professor Doutor, em regime de dedicação integral a docência e pesquisa junto a EPUSP, e colaborador do Laboratório de Pesquisa em Automação e Proteção de Sistemas Elétricos (L.PROT). Áreas de interesse são: modelamento e simulação em tempo real, acionamentos, automação industrial, sistemas de controle, hardware e software, redes inteligentes, computação e animação gráfica, TI's ópticos, proteção, automação e controle de sistemas elétricos com IEC 61850, ferramentas apoio ao ensino de engenharia.
- (3) **CARLOS AUGUSTO RODRIGUES**
Carlos Augusto Rodrigues <http://lattes.cnpq.br/4810367888721753>, Brasileiro, 58 anos, Residente em São Paulo - Capital. Formação acadêmica: Possui graduação em Matemática pelo Centro Universitário Fundação Santo André (1985) e graduação em Engenharia Elétrica, pela Faculdade de Engenharia São Paulo (2011), Pós-Graduação em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Paulista (2014) e professor na Engenharia Elétrica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2021). Atuação Profissional atual: Trabalhou no ISACTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista), há 36 anos como Engenheiro Eletricista. Atua áreas de Sistemas de Supervisão de Estação, Teleproteção de Subestação, Telecomunicações e sistemas de energia em corrente contínua.
- (4) **THIAGO FABRICIO ALAMINO**
Profissional com 10 anos de experiência em projetos de médio e grande porte em subestações de energia elétrica com MBA em Gestão de Projetos, Gestão de Negócios e mestrando em Sistema Elétrico de Potência. Amplo conhecimento em gerenciamento de projetos elétricos e desenvolvimento de soluções em subestações com classe de tensão de 13,8 a 525 kV. Experiência com: Elaboração de especificações técnicas; Suporte na realização de orçamento, cronograma e planejamento; Implantação de sistemas SPCS, associados a novos empreendimentos decorrentes de autorização e editais de leilão ANEEL; Elaboração e monitoramento de indicadores.
- (5) **RAFAEL HERRERO ALONSO**
Rafael Herrero é Engenheiro Eletricista formado pela FEI (2004), com Mestrado (2009), Doutorado (2015) e Pós-doutorado (2021) pela Escola Politécnica-USP. Com mais de 10 anos de experiência em projeto de P&Ds, foi responsável pelo desenvolvimento do Wi-Fi Solar (2009), participou do projeto de Carport/FV (500kW) em Parque Público/SP (2012-2017) e foi o pesquisador responsável pelo projeto de sistema FV/BESS/Estação-solarimétrica, integrados a uma plataforma de monitoramento multidisciplinar na POLI/USP (2019-2021), para capacitação de alunos e formação de mestres e doutores. Hoje tem atuado em pesquisas sobre REDs, análise de desempenho, SE4.0, modelagem computacional, IoT e IA.
- (6) **JULIO CEZAR DE OLIVEIRA**
Julio Oliveira tem 25 anos de experiência na automação de subestações pela Hitachi. Pós-graduado em Redes de Computadores pela UNICSUL, mestre em Engenharia de Computação pelo IPT-SP e MBA em Gestão Estratégica de Negócios pela FGV-SP, participou da elaboração e testes de sistemas para várias concessionárias de energia no Brasil. Colaborou em atividades de P&D dos IEDs da família RELION na Suécia, e atualmente exerce a função de Gerente de Tecnologia com responsabilidade de promover soluções de inovação e indústria 4.0. Foi responsável pela implementação da primeira subestação digital da América Latina usando os recursos da norma IEC 61850.
- (7) **MARCELO KNORICH ZUFFO**
Engenheiro Eletricista (1989), é Professor Titular (2006) junto ao Depto. de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Escola Politécnica da USP. Tem atuado junto ao Laboratório de Sistemas Integráveis coordenando pesquisas e desenvolvimentos em Meios Eletrônicos Interativos. Desde 2011 Coordena o Centro Interdisciplinar em Tecnologias Interativas da USP. Em 2006 foi agraciado com o Prêmio Personalidade de Tecnologia categoria Inovação Tecnológica. Em 2019 foi agraciado com o Prêmio Mercosul de Ciência e Tecnologia pelas suas contribuições na área de internet das coisas. Desde o dia 19 de Março de 2020, tem se dedicado ao projeto INSPIRE: Ventilador Emergencial de Baixo Custo.