



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

COMPARTILHANDO EXPERIÊNCIAS DURANTE A DIGITALIZAÇÃO DA SUBESTAÇÃO JAGUARIÚNA DA CTEEP BASEADA NA IEC 61850 NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

**GIOVANNI MANASSERO JUNIOR(1); MILANA LIMA DOS SANTOS(1); FRANCISCO ELÂNIO BEZERRA(1);
JULIO CEZAR DE OLIVEIRA(2); DANIEL NASCIMENTO BARBIN(3); ALEX HIDEAKI TAKEDA(3); ELDER
FERREIRA KOBAYASHI (3); MARCOS HILARIO SYLVESTRE
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (1); HITACHI ABB POWER GRIDS(2); ISA CTEEP(3)**

RESUMO

Este trabalho descreve a especificação da digitalização da subestação Jaguariúna da ISA-CTEEP e apresenta as experiências adquiridas durante a elaboração dos procedimentos de testes e comissionamento dessa solução. A digitalização utiliza a IEC61850 e o conceito de controle e proteção centralizados (CPC), que ganhou espaço internacional desde a criação do *Working Group K15*, do IEEE (1). Pretende-se avaliar o desempenho de um CPC da Hitachi-ABB utilizando a infraestrutura do L•PROT. Portanto, este artigo descreve a arquitetura, os resultados esperados e os desafios, bem como as soluções adotadas durante essa proposta de digitalização de Jaguariúna com foco no conceito da Indústria 4.0.

PALAVRAS-CHAVE

IEC 61850; Subestação Digital; Barramento de Processos; SAS; Comissionamento; Indústria 4.0.

1.0 INTRODUÇÃO

Desde a primeira Revolução Industrial, a sociedade tem buscado formas de alterar seus processos de produção para suprir as crescentes demandas da sociedade. Essa busca deu origem a inúmeras pesquisas e desenvolvimentos, que culminaram em revoluções subsequentes nos meios e métodos de produção, como pode ser observado na Segunda, Terceira e, agora, Quarta revoluções industriais. Neste ínterim, observa-se que os resultados e melhorias nesses processos são cada vez mais frequentes, e rapidamente alimentam novas mudanças, num perfil evolucionário praticamente exponencial. Nesse cenário, o setor elétrico é o alicerce que condiciona e determina o sucesso desta evolução, acompanhando o desenvolvimento tecnológico de inúmeros setores, senão liderando o surgimento de novas soluções de engenharia sustentáveis, para atender a uma lista cada vez mais exigente de requisitos e compromissos com a sociedade e com o planeta.

Pela popularização de sistemas computacionais e das telecomunicações de dados com a Internet, vive-se um tempo de mudanças vertiginosas, onde as pessoas, as relações de trabalho, as indústrias e seus processos estão sendo fortemente impactados. No setor elétrico, especialmente devido à ampliação das digitalizações e redes de comunicação, tais transformações têm sido importantes, modificando práticas e processos adotados há dezenas de anos, para obter maior excelência operacional, com maior segurança, eficiência e continuidade no fornecimento de energia, além de criar uma nova miríade de serviços e recursos para a sociedade.

Nesse contexto de difusão de tecnologias digitais, de novas formas de transmissão de dados, da expansão da utilização de fibras óticas, com equipamentos cada vez mais sofisticados, é crítico pensar e projetar as subestações do futuro. Isto fomenta a pesquisa e a inovação neste setor e na indústria em geral, por exemplo, para a atualização tecnológica dos sistemas, na manutenção da alta confiabilidade e estabilidade, diante do aumento da demanda de energia, da competitividade das empresas do setor, na geração, transmissão e distribuição, e frente aos enormes desafios de sustentabilidade.

O Projeto de P&D da ISA-CTEEP em parceria com o L•PROT (Laboratório de Pesquisa em Proteção e Automação de Sistemas Elétricos), LSITec (Laboratório de Sistemas Integráveis Tecnológico), PRO (Departamento de Engenharia de Produção da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo) e Hitachi ABB, busca desenvolver os conceitos de uma subestação para o futuro, que atenda à aplicação de inovação e novas tecnologias, denominada Subestação 4.0.

1.1 Indústria 4.0

O conceito da Indústria 4.0 nasce no início da década de 2010 em um programa de desenvolvimento tecnológico industrial do governo alemão. Tecnologias de informação e comunicação já eram usadas nas complexas cadeias produtivas alemãs desde a década de 70. Seguindo a evolução dos computadores e da Internet a partir dos anos 90,

é cada vez mais visível a tendência de um mundo em que a computação ubíqua se torna realidade (2). De acordo com a Academia Nacional de Ciência e Engenharia Alemã (ACATECH), o desenvolvimento da Indústria 4.0 é um passo crucial para fortalecer a competitividade das indústrias e direcionar soluções para problemas globais, como eficiência energética e de recursos, e mudanças sociodemográficas (2).

Como conceitos centrais da Indústria 4.0, apontam-se a Internet das Coisas e Serviços (IoT), sistemas ciberfísicos (CPS), *smart factories* (possíveis graças às redes integrando todo o sistema produtivo), *smart products*, dentre outras tecnologias, que prometem elevados graus de customização e flexibilidade, além da integração da cadeia de suprimentos, novas formas de criação de valor e novos modelos de negócios (2). Além dessas, outras tecnologias são críticas para um ambiente seguro e durável: o contínuo desenvolvimento de tecnologias de comunicação, coleções massivas de dados, ou *big data*, e sua análise, computação em nuvem e cibersegurança (3).

A Indústria 4.0 traz consigo importantes mudanças, não somente nas tecnologias e equipamentos, mas também na relação entre os colaboradores e seu trabalho. Os esforços de inovação não devem se limitar aos desafios tecnológicos, mas englobar também a organização do trabalho e a formação e capacitação de recursos humanos para atuar neste novo cenário dinâmico. Algumas tendências apontadas neste sentido são: uma abordagem sociotécnica do trabalho, um aumento da responsabilidade individual, a exigência de maior flexibilidade e autorregulação do trabalho, e o relacionamento entre pessoas e máquinas inteligentes. Tudo isso exige esforços ativos, tanto dos operadores quanto da gestão e dos projetistas do trabalho (2). Além disso, a partir de um maior grau de automação, pode-se chegar a sistemas produtivos sem trabalho humano, como a *computer integrated manufacture* (4).

1.2 Subestação 4.0

Especialmente no setor elétrico, os principais focos da Indústria 4.0 são maior adaptabilidade, previsibilidade e confiabilidade, que devem ser atingidos por meio de um ecossistema conectado, descentralizado e integrado (5). Particularmente a chamada *Smart Grid Industry 4.0* deve entregar "eletricidade inteligente" através de tecnologias de comunicação avançadas, o que pode resultar em muitas vantagens para o usuário, para a fornecedora/concessionária e para o sistema, com fontes de energia renováveis e distribuídas, maior eficiência, confiabilidade e segurança, entre outros (3). Ainda de acordo com (3), os princípios da transformação 4.0 no setor elétrico são a descentralização, a virtualização, a capacitação em tempo real, a orientação a serviços, a modularização e a interoperabilidade. Para isso, são necessárias uma integração ubíqua dos dados, flexibilidade, comunicação segura e organização autônoma inteligente.

Cabem também considerações sobre segurança cibernética, um requisito para qualquer sistema baseado em informações. A segurança – seja ela patrimonial ou pessoal – sempre foi necessária, mas, especialmente no contexto de sistemas digitais e conectados, ela ganha a instância da informação. Deve-se garantir que pessoas ou sistemas não acessem partes protegidas, e que os dados que neles circulam estejam protegidos de invasões, corrupção ou uso indevido. Mais do que isso, ela pode ser encarada como uma forma de segurança patrimonial, na qual os ativos da empresa são seus dados e sua infraestrutura de suporte.

2.0 SUBESTAÇÃO DE ENERGIA NA PERSPECTIVA DA INDÚSTRIA 4.0

Como mencionado em (6), a automação e digitalização de subestações engloba a utilização de sistemas SCADA, de redes digitais de comunicação de dados de alta velocidade, de grandes bases de dados e informações, de dispositivos distribuídos de aquisição e coleta de informações – como aquelas presentes em soluções e tecnologias da *Internet of Things* (IoT) –, dispositivos eletrônicos inteligentes, digitais, multifuncionais, inteligentes e interoperáveis (IEDs), reguladores e controladores programáveis, além de uma vasta rede de sensores, instrumentações e atuadores, conectando equipamentos primários das subestações e redes de transmissão e distribuição até seus centros de operação.

Estes recursos de automação e digitalização apresentam vantagens e benefícios significativos para a operação da rede e para o fornecimento de energia aos consumidores, tais como: diminuição nas interrupções de fornecimento e no tempo médio das interrupções, aumento na confiabilidade do sistema, aumento na rapidez das manobras, melhora na qualidade da energia entregue aos centros de consumo, aumento na vida útil dos equipamentos da subestação e redução dos custos de manutenção e operação (6).

A estruturação conceitual da Subestação 4.0 possui quatro pilares que representam os conceitos mais amplos e centrais, dos quais desdobram-se oito habilitadores e diversas tecnologias. A Figura 1 estabelece uma relação entre os quatro pilares (excelência operacional, transformação digital, automatização de processos e *smart working*) e os oito habilitadores e entre os oito habilitadores e as tecnologias mais recentes.

2.1 Pilares conceituais

Os pilares estão relacionados aos objetivos do desenvolvimento de uma Subestação 4.0, porém podem ser utilizados e/ou adaptados a outros cenários dentro do setor elétrico.

2.1.1 Excelência operacional

Por excelência operacional, entende-se o conjunto de características desejadas e buscadas por uma subestação elétrica de referência. De forma bastante ampla, inclui o valor gerado aos consumidores, à empresa operadora e seus colaboradores, e às demais partes interessadas na engenharia, operação e manutenção de uma subestação.

Assim, incorpora aspectos da: confiabilidade; redução de custos; minimização de riscos; flexibilidade; agilidade e responsividade; e sustentabilidade.

Por isso, é colocada como um pilar central, objetivo da implementação de uma subestação mais digitalizada e inteligente. A maximização da excelência operacional da empresa operadora da subestação, no caso a ISA-CTEEP, tem impactos positivos que se estendem em vários níveis: o Sistema Interligado Nacional (SIN), as outras empresas da cadeia e os consumidores finais. A busca por uma melhoria da excelência operacional é o que direciona o desenvolvimento de uma Subestação 4.0 e sua implementação. A partir desta busca se desdobram os demais pilares, habilitadores e tecnologias – o arcabouço conceitual descrito nesta seção – conceitos importantes para a definição da arquitetura, objeto deste artigo.

Numa subestação, a melhoria da excelência operacional tem potencial de trazer uma redução de custos com penalidades por não fornecimento, custos com manutenção e consumo energético, por exemplo. Além disso, pode promover uma melhoria das condições e segurança do trabalho, da utilização da mão-de-obra, da responsividade e atuação dos sistemas de proteção, e prover dados que apoiam a tomada de decisões mais informadas e otimizadas.

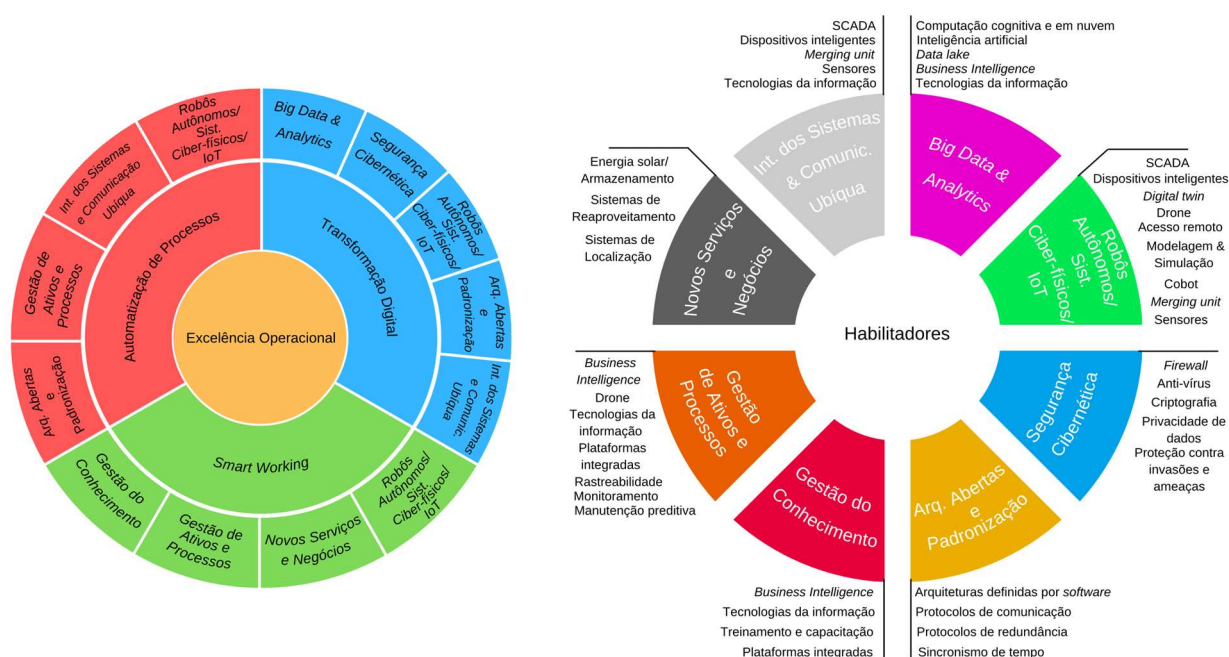


Figura 1. Pilares (à esquerda), habilitadores (à direita) e suas tecnologias associadas

2.1.2 Transformação digital

Este pilar considera os elementos relacionados à digitalização e tecnologias associadas, com importantes benefícios. Inclui a digitalização de sistemas, da coleta e análise de dados, *big data* e *analytics*, a conectividade de dispositivos em redes, e as necessárias considerações sobre segurança cibernética, com o objetivo de melhorar a eficiência dos recursos e a produtividade, para aumentar o poder competitivo das empresas (7).

A digitalização de uma subestação tem o potencial de aumentar a confiabilidade e reduzir custos. O aprendizado de máquina a partir de um grande volume de dados históricos pode auxiliar na manutenção de ativos. O conhecimento extraído dos dados pode também auxiliar os processos de tomada de decisão (8).

2.1.3 Automatização de processos

A automatização de processos se relaciona à busca de um uso mais eficiente de recursos materiais e humanos. Ela possibilita uma integração de todo o sistema de ponta a ponta: tanto verticalmente — do processo até a central de negócios —, quanto horizontalmente, entre as etapas de processos e até mesmo excedendo as fronteiras de uma única empresa.

O roteiro tecnológico, com o fim de estabelecer esse pilar, inclui o desenvolvimento de sensores e de funcionalidades como: manutenção e operação, conectividade, rastreabilidade, modelos virtuais, interoperabilidade, protocolos unificados (9), além de IoT, sistemas autônomos (10) e sistemas ciberfísicos (2, 9).

É possível prever diferentes implementações para a automatização de procedimentos operacionais no contexto da Subestação 4.0. As principais características vislumbradas são a orientação a serviços, a responsividade em tempo real, a operação automatizada, aspectos de redundância de rede e de protocolos. Explorá-las pode promover a integração de todo o sistema, não apenas de forma hierárquica, mas também permitindo um fluxo de dados e informações relevantes para os procedimentos.

2.1.4 Smart working

A dimensão *smart working* considera os elementos relacionados ao trabalhador e às mudanças no trabalho introduzidas pelas tecnologias da Indústria 4.0, além da gestão do conhecimento necessária para a implementação efetiva de uma estratégia 4.0 em subestações elétricas. São incluídas aqui mudanças na organização do trabalho, considerações sobre a segurança dos seus colaboradores, formação de mão-de-obra mais especializada ou mais flexível, treinamento, capacitação, avaliação de desempenho, documentação e normatização dos processos de operação, manutenção e engenharia.

Neste pilar estão contidas as tecnologias de suporte às tarefas, buscando oferecer melhores condições de trabalho em termos de segurança, produtividade e tomada de decisão. Dentre outras, pode-se citar o treinamento e capacitação com ferramentas digitais e virtuais, com o uso de realidade aumentada e realidade virtual no treinamento e simulação; monitoramento e operação remotos, e ainda robôs colaborativos (CoBots) (11). No que se refere à gestão de conhecimento, destaca-se a necessária padronização, a consolidação e a transmissão de conhecimento dentro da organização (entre colaboradores, áreas ou subestações, por exemplo).

As tecnologias e métodos antes estabelecidos também devem acompanhar a evolução — os procedimentos executados de determinada forma até hoje podem sofrer mudanças em um horizonte muito mais curto que anteriormente. Tudo isso requer a constante atualização de habilidades e competências dos colaboradores, abrangendo todos os níveis hierárquicos e diferentes áreas da empresa.

Podem-se vislumbrar algumas mudanças que o *smart working* pode trazer às subestações elétricas. O uso de ferramentas de realidade virtual deve permitir um treinamento de mão-de-obra mais rápido e imersivo, podendo incluir simulação de situações críticas. A realidade aumentada e o uso de dispositivos móveis podem transformar o trabalho da operação no pátio da subestação, oferecendo um guia em tempo real e interativo para a execução de tarefas de manutenção, por exemplo. Adicionalmente, pode-se oferecer aos trabalhadores de campo um acesso mais amplo e rápido a informações rastreáveis dos equipamentos em inspeções ou atividades de manutenção.

2.2 Habilitadores e tecnologias

Neste item são descritos os oito habilitadores dos quatro pilares descritos no item anterior. Conforme mencionado, esses habilitadores foram escolhidos tendo como referência a Subestação 4.0. No entanto, são amplos o suficiente para serem aplicados em outros contextos do setor elétrico.

2.2.1 Big data e Analytics

Este habilitador está relacionado com a capacidade que os sistemas computacionais da Subestação 4.0 devem possuir de trabalhar, tratar e analisar grandes volumes de dados (oscilografias de tensões e correntes, registros digitais de perturbações, valores de potências elétricas, tráfegos de dados nos barramentos de comunicação, sinais digitais de proteção, grandezas de monitoramento, informações sobre o estado operacional de ativos) de maneira rápida e efetiva, de modo a maximizar a velocidade dos processos, operações e tomadas de decisão. Exemplos de tecnologias existentes que apresentam correlação mais forte com este habilitador são algoritmos de computação cognitiva e em nuvem, inteligência artificial, plataformas de *data lake* e tecnologias da informação.

2.2.2 Robôs autônomos, sistemas ciberfísicos e IoT

Algumas das principais tecnologias que têm relação com este habilitador são os sistemas SCADA com IHM de alto desempenho, IEDs, *digital twins* e sistemas para modelagem e simulação do sistema, drones, sistemas de acesso e controle remoto, sensores, *merging units*, robôs colaborativos (11) e arquiteturas definidas por *software*.

2.2.3 Integração dos sistemas e comunicação ubíqua

Para que as operações sejam efetuadas de maneira automática e veloz, todos os dispositivos, componentes e processos da Subestação 4.0 devem ser integrados e interconectados entre si (integração vertical e horizontal) e a própria Subestação 4.0 deve estar integrada com os centros de operação remota e com demais subestações (integração *end to end*). Dessa forma, as tecnologias fundamentais para a viabilização deste habilitador são os sistemas supervisórios SCADA, sensores e transformadores de instrumentação, *merging units*, protocolos de comunicação e redundância e tecnologias da informação. Tecnologias tais como realidade virtual e aumentada, inteligência artificial e computação em nuvem também podem ser associadas com este habilitador.

2.2.4 Segurança cibernética

Por serem digitalizados e se conectarem por meio de redes de comunicação e da internet, todos os sistemas da Subestação 4.0 devem ser munidos de sistemas de segurança cibernética capazes de proteger a infraestrutura da subestação contra ataques. Para tanto, é possível utilizar tecnologias tais como *firewalls*, antivírus, algoritmos de criptografia e *softwares* de privacidade de dados e de proteção contra invasões e ameaças externas.

2.2.5 Arquiteturas abertas e padronização

As redes de comunicação da Subestação 4.0 devem ser implementadas com protocolos de comunicação, redundância e sincronismo de tempo abertos e padronizados, de modo que os equipamentos possam se comunicar entre si, independentemente de seus fabricantes serem distintos.

A arquitetura de redes deve apresentar os níveis de estação, vão e processo, os quais se comunicam por meio dos barramentos de processo e de estação.

2.2.6 Gestão do conhecimento

Este habilitador é baseado na ideia de que todo o conhecimento gerado deve ser devidamente documentado e registrado, com o objetivo de capacitar novos colaboradores a realizarem as mais diversas atividades existentes no contexto da Subestação 4.0.

Exemplos de tecnologias que podem ser utilizadas para isso são plataformas de *business intelligence*, plataformas integradas (para integrar guias, diretrizes, cursos, entre outros), ferramentas de treinamento e capacitação, tecnologias da informação e até mesmo realidade virtual e aumentada.

2.2.7 Gestão de ativos e processos

Todos os ativos da Subestação 4.0 (equipamentos primários, equipamentos de automação, proteção e controle, sistemas de comunicação, entre outros) devem ter seus dados principais (procedência, data e local de fabricação, histórico de manutenções, entre outros) devidamente documentados e atualizados. Além disso, as características dos processos que ocorrem na rotina de operações também devem ser registradas adequadamente.

Entre as principais tecnologias que se relacionam com a gestão dos ativos e dos processos, podem ser citadas as plataformas de *business intelligence*, tecnologias da informação, drones (para supervisão e monitoramento de linhas de transmissão, transformadores de potência, entre outros) e também sistemas de manutenção preditiva e de rastreabilidade dos ativos.

2.2.8 Criação e desenvolvimento de novos serviços e negócios

Este habilitador está relacionado ao desenvolvimento de outras oportunidades de negócios no âmbito da Subestação 4.0. Incluem-se aqui atividades de caráter sustentável (energia solar com armazenamento para serviços auxiliares da subestação, captação de água de chuva, plantio de árvores e/ou vegetação de pequeno porte, aproveitamento de podas e resíduos), sistemas de localização geográfica, projetos sociais e até mesmo aplicações de *customer experience* (por exemplo um sistema que mostre aos consumidores os caminhos e desafios existentes para que a energia elétrica chegue aos mais diversos centros de consumo).

3.0 PROPOSTA DE ARQUITETURA PARA A SUBESTAÇÃO 4.0

A arquitetura de comunicação é um quesito fundamental para garantir o desempenho, segurança operacional, flexibilidade e concretizar os benefícios preconizados pelas aplicações de subestações digitais conforme as técnicas disponíveis no estado da arte da norma IEC 61850. Exemplos dos benefícios são maior facilidade de instalação, de expansões futuras e redução de tempo de ensaios de campo quando comparadas com projetos convencionais.

A subestação 4.0 contempla topologias Ethernet para os barramentos de estação e processo, dispostas com o objetivo de cumprir as necessidades de um sistema de missão crítica (proteção, controle e supervisão) com ênfase na disponibilidade e segurança.

3.1 Redes dos barramentos de estação e processo

3.1.1 Barramento de estação

O barramento de estação concerne ao perímetro da rede tipicamente implementada na sala de controle da subestação, e integra os IEDs, sistemas SCADA locais (nível 2), computadores de operação e engenharia, oscilógrafos, relógios GPS e, eventualmente, medidores. Devido a esta característica, o barramento de estação remete a uma rede com alto grau de conectividade, integrando diversos dispositivos de automação e supervisão dentro da sala de controle. Entretanto, é importante ressaltar que se trata também de uma rede com altos requisitos de desempenho, em virtude dos serviços de tempo real que por ela trafegam, como as mensagens da classe *Generic Substation Events* (GSE) —para intertravamentos, seleções lógicas e para transmissão de dados essenciais para o funcionamento dos esquemas de proteção— e a sincronização por meio do *Precision Time Protocol* (PTP), de acordo com o perfil *Power Utility Automation* (IEC 61850-9-3).

Para aliar os temas de desempenho e resiliência demandadas pelo barramento de estação, além dos recursos de segmentação dos domínios de colisão e de *broadcast*, priorização de tráfego, filtragem de *multicast* — por meio da técnica *Internet Group Management Protocol* (IGMP) e a seleção das informações essenciais para o fluxo de comunicação vertical e horizontal, foi adotado um recurso previsto na norma IEC 62439-3 (redes industriais de alta disponibilidade) para o estabelecimento de uma topologia redundante, com tempo zero de chaveamento entre interfaces. Tal recurso se refere ao uso do *Parallel Redundancy Protocol* (PRP). Com este nível de redundância implementada nos IEDs e no sistema SCADA, e ainda contando com GPS duplo para a sincronização via PTP, são instaladas duas redes paralelas, denominadas LAN A e LAN B. As interfaces dos IEDs e do sistema SCADA operam com o mesmo endereço de enlace e de rede, uma vez que o PRP possui um algoritmo preparado para realizar o descarte de datagramas (quadros Ethernet) em tempo real e sem impactos para as camadas superiores do modelo OSI. Portanto, em casos de falhas do tipo N-1, não há interrupção dos serviços de comunicação.

Há, também, necessidade de monitoramento do transformador da subestação para fins de gestão de ativos. O sensor instalado neste equipamento será integrado ao barramento de estação por uma rede sem fio, utilizando rádios industriais da Htachi (TropOS), e, da mesma forma, será integrado um subsistema IoT de monitoramento dos bancos de bateria ao sistema SCADA local.

3.1.2 Barramento de processo

O barramento de processo é, conceitualmente, a rede que conecta os IEDs instalados na sala de controle da subestação às *merging units* ou equipamentos primários inteligentes localizados no pátio. Seu objetivo é transportar os dados de corrente e tensão digitalizados e disponibilizados por meio do protocolo *Sampled Measured Values* (SMV) entre estes equipamentos, assim como ocorre com sinais binários (comandos, alarmes e sinalizações) por meio dos serviços GSE.

Por esta natureza específica e pela importância de manter o sistema de proteção e controle em funcionamento, o barramento de processo representa a superfície de comunicação com maior nível de criticidade da subestação, e, portanto, neste projeto de Jaguariúna, é segregada fisicamente em relação ao barramento de estação. Assim, há vantagens consideráveis para o planejamento e controle de tráfego (que pode ser sensivelmente maior se comparado ao tráfego do barramento de estação, devido à digitalização das correntes e tensões) e para as ampliações futuras que a subestação pode receber. Além dos equipamentos que participam desta rede, há uma outra diferença relevante que deve ser observada em relação à topologia anterior: o barramento de processo opera essencialmente com protocolos e serviços de tempo real (em camada de enlace): SMVs, GSEs e PTP, este último para fins de sincronismo das *merging units* na ordem de 1 a 4 microssegundos.

Para atender aos requisitos da aplicação, e de forma análoga ao realizado com o barramento de estação, foi escolhido outro mecanismo de redundância de rede previsto na norma IEC 62439-3: O protocolo *High-availability Seamless Redundancy* (HSR). Por meio do uso desta técnica, são estabelecidos anéis Ethernet entre as *merging units* no pátio e os IEDs na sala de controle, uma rede de comunicação exclusiva para o tráfego do barramento de processo sem a necessidade de switches, propiciando um isolamento físico deste segmento, simplificando a engenharia e a instalação de todo o sistema de automação.

Todavia, para fins de análises comparativas neste empreendimento, o barramento de processo também contará com uma rede implementada com a redundância via PRP, e assim serão gerados subsídios para avaliação futura sobre quais destas técnicas podem ser aplicadas com maior eficácia e benefícios de acordo com o perfil das aplicações.

A Figura 2 apresenta a topologia aplicada para o projeto da subestação digital Jaguariúna. Como mencionado, a sincronização das *merging units* é realizada por meio do protocolo PTP. Graças aos recursos de *boundary clock* e *transparent clock* previstos na norma IEC 61850-9-3 e implementados nos IEDs aplicados a este projeto, os quadros de sincronismo atravessam as interfaces conectadas ao barramento de estação e se difundem até as *merging units*. Dessa forma, não é necessário conectar os relógios GPS diretamente ao barramento de processo, diminuindo a complexidade da arquitetura e eventualmente custos adicionais para a instalação de mídias físicas dedicadas para esta finalidade.

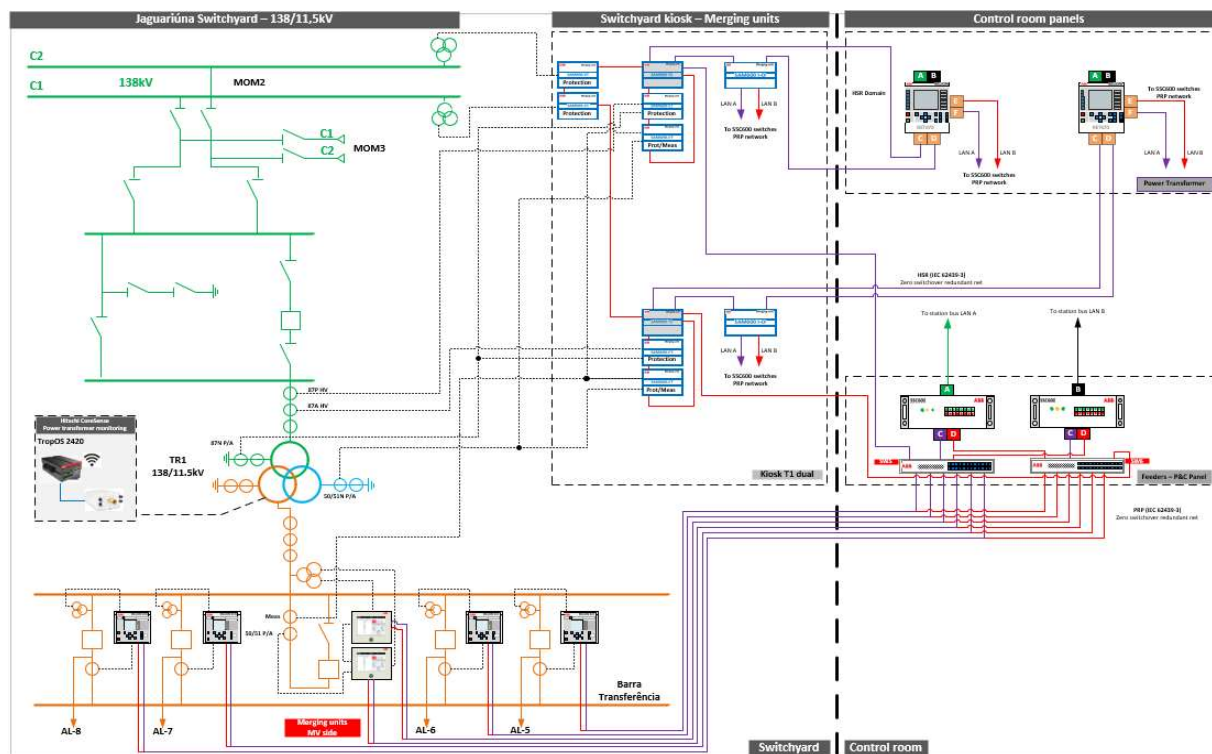


Figura 2. Topologia física do barramento de processo

3.1.3 Cadeias de proteção quádruplas

O projeto da subestação digital de Jaguariúna aborda o conceito de funções de proteção e controle centralizadas (CPC), isto é, um único IED é capaz de executar tais funções para toda a subestação, considerando a entrada do vão de linha, o vão do transformador de 138/11,5kV e os 5 alimentadores de 11,5kV. Para implementar este arranjo, dois critérios distintos foram usados:

- Proteção e controle centralizados por um IED tradicional: remete ao uso de dois IEDs RELION 670 da Hitachi como unidades primária e alternada e que se integram às arquiteturas redundantes dos barramentos de estação e processo
- Proteção e controle centralizados por um computador: consiste no uso de dois computadores desenvolvidos exclusivamente para agregar funções, como observado nos IEDs tradicionais, recebendo dados por meio dos protocolos SMV, GSE, PTP e disponibilizando as informações ao sistema SCADA via protocolo MMS. De forma análoga ao caso anterior, duas unidades SSC600 da ABB são aplicadas como unidades terciária e quaternária.

A escolha dessa arquitetura (IEDs RELION 670 e SSC600) garante a possibilidade de avaliação da proteção e controle centralizados (SSC600), sem perda de confiabilidade (RELION 670).

3.1.4 Cibersegurança

A segurança da rede e seus elementos é um elemento inerente às subestações digitais e às demais aplicações de indústria 4.0. A arquitetura de comunicação de Jaguariúna, em seus barramentos de estação e processo, conta com os métodos de defesa em profundidade (técnicas como *endpoint protection*, *whitelisting*, *firewalls* de forma genérica, segregação dos domínios de rede para redução da superfície de ataque e *hardening* dos servidores *switches* e IEDs da arquitetura proposta) e com defesa em diversidade (uso de *firewalls statefull* e *next generation*), onde equipamentos de proteção de perímetro de mesma classe, porém com técnicas diferentes, são aplicados para mitigar possíveis invasões às redes de automação (12).

4.0 PROPOSTA DE ENSAIOS

Os ensaios da subestação digital de Jaguariúna foram planejados para abranger, de forma holística, toda a arquitetura de comunicação e seus elementos, incluindo temas que remetem a performance e verificações da resiliência da topologia implementada.

4.1 Proteção e controle

Os IEDs e *merging units* serão testados em conjunto, considerando os níveis hierárquicos 0 (processo) e 1 (IEDs) do ecossistema de automação da subestação. As correntes, tensões e sinais binários serão conectados ao painel da *merging unit* e, por meio dos protocolos SMV e GSE, será estabelecido o fluxo de dados para os IEDs que constituem as quatro cadeias de proteção do projeto. Neste âmbito, serão testadas cada função de proteção (incluindo a verificação das curvas características), intertravamentos e comandos.

4.2 Rede de comunicação e redundância

Esses ensaios consistem na verificação da disponibilidade da arquitetura em condições normais e de falhas do tipo N-1, com a avaliação da eficácia dos protocolos de redundância, conforme na norma IEC 62439-3, e ensaios de conectividade da rede sem fio que interconectará o sensor de monitoramento do transformador (no pátio da subestação) e os dispositivos IoT do banco de baterias (na sala de controle) ao barramento de estação.

4.3 Desempenho da rede

Este ensaio terá como objetivo comprovar que as determinações na norma IEC 61850-5 estão asseguradas quanto ao tempo de transmissão das mensagens críticas, com a medição dos tempos de operação das cadeias de proteção. Também serão verificadas as condições de funcionamento da rede em cenários de carga (tráfego) que resultam em maior ocupação da banda disponível em relação às condições normais de operação.

4.4 Pentesting (teste de penetração)

É um teste conectado ao tema de cibersegurança. Neste âmbito serão usadas ferramentas e técnicas para tentativas de invasão da arquitetura e exploração das eventuais vulnerabilidades da topologia, propondo ações corretivas e corroborando para a criação de um arcabouço que possa ser reutilizado para aplicações de subestações digitais futuras.

4.5 Sistema supervisor e integração com o centro de controle

Nesta etapa serão testados os elementos de conexão do sistema SCADA local (nível hierárquico 2) à rede do barramento de estação para a verificação de eventos, alarmes, controles e sinalizações. Além disso, será observada a integração deste sistema com o centro de controle da ISA-CTEEP por meio do protocolo ICCP.

4.6 Resiliência a falhas

Trata-se de um complemento ao item 4.2, com o objetivo de verificar a resiliência de todo o sistema em cenários de múltiplas combinações de falhas: comunicação, IEDs (considerando as quatro cadeias de proteção e controle), GPS, *switches*, *merging units* e sistema SCADA.

4.7 Sincronização de tempo

São ensaios exclusivos para a comprovação do correto funcionamento do protocolo PTP para a sincronização de todos os elementos da rede. Será analisada, adicionalmente, a coexistência de dois perfis distintos do PTP no mesmo segmento de rede (*Power Utility Automation* e *Power Profile*) e o *Simple Network Time Protocol* (SNTP), que é usado especificamente para o sincronismo do sistema supervisor e de outros dispositivos que não suportam o PTP.

4.8 Modos “teste” e “simulação” conforme a norma IEC 61850

Os modos “teste” e “simulação” trazem uma ruptura na forma de como os ensaios podem ser realizados no contexto de uma subestação digital. O objetivo neste caso é explorar as vantagens e particularidades destes modos quando utilizados para os testes de proteção e controle simulando os dados de SMV e GSE para os IEDs (considerando inclusive situações com o sistema energizado) e avaliar os diferentes comportamentos dos IEDs na condição de teste: por exemplo, serão observadas as alterações das mensagens GSE disparadas na direção das *merging units*, os bloqueios das saídas binárias destas *merging units* e as contribuições que este recurso pode oferecer para atividades de manutenção.

5.0 CONCLUSÕES

A continuidade no desenvolvimento da excelência operacional da rede elétrica pode ser efetivada através da implementação de subestações mais flexíveis, inteligentes e que minimizam a necessidade de manutenção por diminuir a quantidade de equipamentos no projeto e aumentar a compatibilidade entre eles. Essa é a maior vantagem da implementação das novas tecnologias de comunicação nas subestações de energia.

A norma IEC61850 propõe uma reunião de protocolos de comunicação, redundância, sincronismo e outros, que podem substituir a maioria dos processos existentes com o objetivo de padronizar a comunicação digital dentro de e entre subestações. É sugerido que a comunicação seja feita através de uma rede Ethernet padrão aberto que alcance todos os dispositivos da subestação, o que cria um extenso meio de compartilhamento e torna a informação ubíqua e acessível. Esta é uma das principais evoluções tecnológicas que a Subestação 4.0 apresenta em relação à subestação convencional.

A padronização e modularização dos equipamentos permite ainda que dispositivos físicos, sendo equipamentos programáveis e em rede, recebam diferentes funcionalidades. Além destas vantagens potenciais com novas funções e recursos, é sobretudo na simplificação de seu cabeamento que as subestações digitalizadas têm vantagens claras: ao se usar meios compartilhados (redes) para o envio de informações digitais, em vez de sinais analógicos dedicados, transportados por milhares de cabos numa subestação.

O desenvolvimento de um ambiente no qual todas as informações podem circular por um barramento de comunicação através dos diversos níveis da subestação é outra vantagem importante. Isso permite que a comunicação de informação no sistema aconteça de forma paralela ao fluxo de energia. Todas as grandezas elétricas e muitos outros dados sobre o sistema de automação e proteção estão disponíveis instantaneamente. Além de se criar um sistema integrado e amplamente conectado, isso possibilita que dados e informações sejam compartilhados, processados e tratados em novos serviços e aplicações mais facilmente, o que permite a melhor tomada de decisões sobre o sistema. Por utilizar arquitetura aberta e implementar mensagens de dados padronizadas, o compartilhamento de dados em rede facilita a compatibilidade e uso de equipamentos de diversos fabricantes no mesmo sistema. Além disso, a abundância da informação e maior facilidade do controle de equipamentos possibilita criar, com dados em tempo real, cenários de simulação, testes de dispositivos ou até mesmo da reprogramação de IEDs ou das conexões da rede sem a necessidade de desativar, em partes ou completamente, a subestação. Dispositivos físicos conectados aos sistemas poderão ser reprogramados em grupos ou até mesmo em sua totalidade para receberem novas funções de proteção que ainda poderão ser testadas com dados reais do sistema, mas sem interferir no processo graças às novas funcionalidades da IEC61850.

Há ainda melhora esperada na confiabilidade do sistema, não apenas pela capacidade de redundâncias, mas também por permitir mudanças na estrutura de conexão da rede (13) e por permitir a aquisição de dados e estados em tempo real. Isso resulta em um monitoramento mais eficiente de falhas e problemas críticos, tanto no processo quanto no sistema de automação, proteção e comunicação e TI, bem como, maior integração entre essas equipes.

Além disso, há a presença de circuitos que monitoram ativamente a disponibilidade dos equipamentos. Ainda é possível combinar os conceitos de informação discutidos e aplicá-los em conjunto com arquiteturas de proteção do tipo Proteção e Controle Centralizados (CPC), que unificarão controle da proteção em uma maneira centralizada e normalmente próxima ao operador, facilitando o monitoramento e a tomada de decisão. Adicionalmente à implementação da inteligência artificial e coordenação dos processos, futuramente espera-se que as decisões possam ser tomadas sem operador e com autoaprendizado (*machine learning*).

6.0 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e à empresa patrocinadora deste projeto de pesquisa e desenvolvimento, ISA-CTEEP.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) RATAN DAS, M. K. et al. Centralized Substation Protection and Control (Report of Working Group K15 of the Substation Protection Subcommittee). 2015. Estados Unidos da América.
- (2) HENNING, Kagermann. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. 2013. Alemanha.
- (3) FAHEEM, Muhammad et al. Smart grid communication and information technologies in the perspective of Industry 4.0: Opportunities and challenges. *Computer Science Review*, v. 30, p. 1-30, 2018.
- (4) WARNECKE, Hans-Jürgen. Computer-integrated manufacture a production strategy. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, v.1, p. 6-12, 1988.
- (5) COMAN, Ciprian Mihai; FLORESCU, Adriana. Electric grid monitoring and control architecture for industry 4.0 systems. In: 2018 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE). IEEE, 2018. p. 1-6.
- (6) NORTHCOTE-GREEN, James; WILSON, Robert. Control and automation of electrical power distribution systems. CRC press, 2017.
- (7) USTUNDAG, Alp; CEVIKCAN, Emre. Industry 4.0: managing the digital transformation. Springer, 2017.
- (8) GIBADULLIN, A. A.; PULYAEVA, V. N.; YERYGIN, Yu V. The need for a digital substation during the digitalization of energy. In: 2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA). IEEE, 2018. p. 1-12.
- (9) LYDON, B. Industry 4.0: Intelligent and flexible production: Digitization improves manufacturing responsiveness, quality, and efficiency. *Tech Magazine*, 2016.
- (10) VAIDYA, Saurabh; AMBAD, Prashant; BHOSLE, Santosh. Industry 4.0—a glimpse. *Procedia manufacturing*, v. 20, p. 233-238, 2018.
- (11) FRANK, Alejandro Germán; DALENOGARE, Lucas Santos; AYALA, Néstor Fabián. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, v. 210, p. 15-26, 2019.
- (12) KISNER, Roger A. et al. Cybersecurity through real-time distributed control systems. Oak Ridge National Laboratory, Technical Report ORNL/TM-2010/30, 2010.
- (13) SOLTYSSEK, L.; SZCZEPANIK, J. The Comparison of the Current and Industry 4.0 Automation and Protection Standards. In: IEEE - 21st International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), p. 1 – 6, 2020.

DADOS BIOGRÁFICOS



Possui graduação (1999), mestrado (2001) e doutorado (2006) em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), com ênfase em sistemas de potência. É professor da EPUSP desde 2009 onde coordena o Laboratório de Pesquisa em Proteção e Automação de Sistemas Elétricos. Desenvolve pesquisa na área de proteção, controle e automação de sistemas elétricos, participou de mais de vinte projetos financiados por agências de fomento e pelo programa de P&D da ANEEL, é autor de mais de quarenta artigos publicados em periódicos e em congressos nacionais e internacionais e possui duas patentes depositadas no INPI.

(2) MILANA LIMA DOS SANTOS
Professora no Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica (PEA) da EPUSP desde 2013. Concluiu a graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal da Paraíba, em Campina Grande, no ano de 1998, e mestrado e doutorado na Universidade de São Paulo em 2010 e 2012, respectivamente. Suas áreas de interesse são: automação e operação de sistemas elétricos e industriais e ferramentas computacionais de suporte ao ensino e aprendizagem.

(3) FRANCISCO ELÂNIO BEZERRA
Doutor em Engenharia de Produção (2020), Mestre em Engenharia de Produção (2017), Graduado em Engenharia Elétrica (2012), Técnico em Telecomunicação (2006). Foi professor dos cursos de Engenharia Elétrica e Mecatrônica na Universidade Nove de Julho, ministrando disciplinas de Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica, Linhas de Transmissão, Circuitos Elétricos e Eletrônica Digital I e II. Atualmente, está cursando o pós-doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (USP), participando de um projeto de digitalização de uma subestação 4.0, e está desenvolvendo um trabalho que envolve técnicas de machine learning para previsão de problemas em disjuntores de alta tensão.

(3) 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.

(4) DANIEL NASCIMENTO BARBIN
Daniel Nascimento Barbin, Engenheiro Eletricista pela Faculdade Politécnica de Jundiaí, Especialista em Proteção de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e MBA do Setor Elétrico pela Fundação Getúlio Vargas (FGV). Trabalha no setor elétrico desde 1996. Atual Coordenador do Grupo de Trabalho – GTSPAT (Sistemas de Proteção, Automação e Telecomunicações) da Força Tarefa da Manutenção (FTM) da ABRATE. Cargo Atual: Coordenador de Comissionamento e Proteção na ISA CTEEP. Jundiaí, São Paulo, Brasil.

(5) ALEX HIDEAKI TAKEDA
Alex Hideaki Takeda, é engenheiro eletricista pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e pós graduado em Automação de Sistemas Elétricos no Instituto Nacional de Telecomunicações em parceria com a Universidade SEL. Possui 8 anos de experiência no comissionamento de sistemas de proteção e controle da ISA CTEEP, na qual participou de diversos projetos de subestações com relés de proteção e controle digitais. Sempre em busca de soluções inovadoras pretende se especializar em subestações digitais.

(6) ELDER FERREIRA KOBAYASHI
Graduado em Engenharia Elétrica pela UNIP, MBA em Gestão e Engenharia da Manutenção e Manufatura pela USP, Especialista em Proteção do Sistema Elétrico pela UNIFEI, MBA do Setor Elétrico pela FGV e Mestrando em Sistemas de Potência pela USP. No setor elétrico há 26 anos, já atuou nas áreas de linhas de transmissão, proteção e controle, operação e engenharia de subestações. Atualmente é Coordenador de Manutenção na ISA CTEEP.

(5) MARCOS HILARIO SYLVESTRE
Marcos Hilario Sylvestre, São Paulo, 14 de janeiro de 1967; Graduação em Engenharia Elétrica – FESP – 1994; Pós-Graduação: Master In Project Management – Uninove – SP – 2012; Mestrando: Sistemas de Potência - USP - 2020/2022. Trabalha há 40 anos no setor elétrico sendo Eletropaulo, EPTE, ISA CTEEP na Implantação e Manutenção nas áreas de Supervisão, Proteção, Automação e Telecomunicações. Trabalhos Publicados: VII SNTTEE – 1998; V SIMPASE – 2003; Mobilidade Do Sistema De Supervisão e Controle em Subestações. XII EDAO – 2012; INTERNATIONAL COLLOQUIUM “BUILDING SMARTER SUBSTATIONS” - Mexico / 2016; Comunicação entre Subestações para Teleproteção via GOOSE em Linha de Transmissão da Rede Básica. XXV SNTTEE - 2019.