

# Digitalização de Subestações e Energias Renováveis

*A integração das fontes de energias renováveis nas redes elétricas, impulsionada pela digitalização, está remodelando o paradigma da geração, distribuição e consumo de energia. Para abordar os desafios relacionados a este assunto convidamos o Engenheiro Master da Vale, Paulo Henrique Vieira Soares. Mestre em engenharia Elétrica pela UNIFEI, possui MBA em Gestão (FGV) e pós-graduação em Sistemas fotovoltaicos pela UFV.*



## Capítulo I

### Introdução à Digitalização de Subestações e Energias Renováveis

#### 1 - INTRODUÇÃO

A era da digitalização tem proporcionado transformações significativas em diversos setores, sendo o energético um dos mais impactados. A integração das fontes de energias renováveis nas redes elétricas, impulsionada pela digitalização, está remodelando o paradigma da geração, distribuição e consumo de energia. Este artigo explora a sinergia entre a digitalização das subestações elétricas e a incorporação das energias renováveis, destacando as tecnologias emergentes, os desafios e as aplicações por meio de exemplos reais no contexto da geração fotovoltaica de grande porte.

#### 2 - CONTEXTUALIZAÇÃO

##### Subestação digital

Uma subestação digital é a evolução das subestações elétricas tradicionais, implementando tecnologias para melhorar a eficiência, a confiabilidade e a segurança do Sistema Elétrico de Potência (SEP), desde a geração, até a transmissão e distribuição de energia elétrica.

Suas principais características são: menor intervenção humana, reduzindo a exposição aos riscos inerentes ao SEP; protocolos de comunicação padronizados, permitindo a integração de diversos dispositivos e sistemas dentro da subestação; compartilhamento de dados; operação remota dos equipamentos, além do monitoramento e diagnóstico em tempo real.

##### Energias renováveis

As energias solar e eólica, no Brasil, têm experimentado um crescimento expressivo, com expansões significativas na capacidade instalada. Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) a capacidade instalada para geração fotovoltaica no Brasil ultrapassou 32 GW em 2023, enquanto a capacidade instalada de geração eólica, fechou o ano com 28,6 GW. Esse desenvolvimento reflete a tendência global de crescimento das energias renováveis e destaca o papel estratégico do Brasil na transição energética.

Destaca-se que a geração eólica é a segunda fonte de energia no Brasil, representando 14,4% da matriz energética brasileira, enquanto a solar corresponde à 5,76% da matriz, conforme dados do Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA). Essa diferença enorme entre a capacidade instalada de energia solar e a porcentagem na matriz energética, possui correlação com o baixo fator de capacidade das usinas fotovoltaicas. Esse parâmetro, reflete a relação entre a geração da usina ao longo de um certo período e sua potência instalada, sendo apresentado com valor típico de 29% a 30% no plano nacional de energia 2050 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

##### Os 3 Ds

Os "3 Ds" do setor elétrico referem-se às três tendências disruptivas que estão moldando a transformação do setor, sendo elas:

**Descarbonização:** Refere-se ao processo de reduzir as emissões

de carbono dentro do setor elétrico. Isso envolve a transição de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, como carvão e gás natural, para fontes de energia renováveis e de baixo carbono, como solar, eólica, hidrelétrica e, em alguns contextos, nuclear. A descarbonização é motivada pela necessidade de reduzir os impactos das mudanças climáticas e de alcançar as metas de sustentabilidade ambiental.

**Descentralização:** Significa a mudança de sistemas de energia centralizados e grandes para redes de energia distribuídas. Isso inclui a geração de energia mais próxima ao ponto de consumo, como painéis solares residenciais ou empresariais, pequenas turbinas eólicas e sistemas de armazenamento de energia em baterias. A descentralização aumenta a resiliência da rede elétrica, reduz as perdas de transmissão e distribuição e permite uma maior participação do consumidor na geração e gerenciamento de energia.

**Digitalização:** Envolve a aplicação de tecnologias digitais no setor elétrico para melhorar a eficiência e a operação das redes de energia. Isso inclui o uso de sensores inteligentes, medidores inteligentes, sistemas de gerenciamento de dados e plataformas de análise avançada. A digitalização permite um melhor monitoramento e controle da rede, facilita a integração de fontes de energia renováveis, melhora a resposta à demanda e apoia novos modelos de negócios.

### Tecnologias Emergentes e sua Importância

A digitalização das subestações é fundamental para a modernização das redes elétricas. Tecnologias emergentes como a

Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (AI) e análise de dados estão revolucionando o século XXI e devem estar cada vez mais presentes nos projetos de energia. Em breve a IA estará otimizando a geração e distribuição de energia, prevenindo falhas no sistema e reduzindo perdas, enquanto isso a IoT possibilitará a comunicação eficiente entre dispositivos diversos, permitindo receber dados da planta e conhecer melhor as informações disponíveis.

Com a ascensão exponencial de dispositivos conectados dentro do sistema elétrico, emergem novas possibilidades anteriormente inexploradas, como o armazenamento de dados e o processamento online. Esta evolução representa um salto significativo em termos de inovação no setor elétrico. No entanto, a expansão da conectividade também intensifica a necessidade de medidas robustas de segurança cibernética. A proteção de redes, dispositivos, programas e dados contra ataques, danos ou acessos não autorizados, torna-se crucial em todos os níveis operacionais e estratégicos.

Violações de dados no setor elétrico podem acarretar consequências severas, incluindo perdas financeiras substanciais, danos à reputação corporativa, interrupção das operações de negócios, erosão da confiança dos clientes e infrações de normativas legais e regulamentares. Diante deste cenário, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) instituiu a Rotina Operacional RO-CB.BR.01, delineando os Controles Mínimos de Segurança Cibernética para o Ambiente Regulado Cibernético. Este documento estabelece diretrizes claras para a implementação de controles de segurança cibernética efetivos, tanto nos centros de operação dos agentes quanto nos equipamentos de infraestrutura.



## Integração de Energias Renováveis

A integração de fontes de energias renováveis, como solar e eólica, representa um marco significativo para o setor elétrico nacional. Contudo, este processo exige uma infraestrutura de rede elétrica adaptável, capaz de gerir a intermitência inerente a essas fontes. Isso envolve a necessidade de combinar essas fontes com sistemas tradicionais de geração de energia, como as usinas hidroelétricas e termoelétricas, para assegurar um fornecimento de energia estável e contínuo.

Inversores, sendo componentes cruciais em sistemas de energia renovável, oferecem vantagens em termos de flexibilidade operacional e capacidade de resposta rápida. No entanto, eles introduzem desafios particulares à estabilidade do sistema elétrico, principalmente devido à ausência de inércia física, um atributo presente nos geradores síncronos convencionais.

Essa distinção fundamental entre geradores síncronos (utilizados tradicionalmente em usinas de geração de energia) e inversores solares ou eólicos (empregados em sistemas de geração de energia renovável) implicam em diferenças profundas que influenciam a dinâmica do sistema elétrico, demandando estratégias inovadoras e adaptativas para manter a estabilidade da rede.

## Gestão e Monitoramento de Subestações

Por meio de sistemas de supervisão e controle, é possível realizar o acionamento remoto e em tempo real das operações, otimizando a eficiência operacional e minimizando o risco de falhas. Estes dispositivos, integrados em rede, são capazes de sincronizar com precisão de milissegundos ou microssegundos, viabilizando a consolidação de todas as informações relevantes em uma única plataforma, garantindo o processamento e análise em ordem cronológica.

Dentre as funcionalidades implementáveis nas subestações digitais, destacam-se a coleta automatizada de oscilografia, o acesso remoto aos parâmetros e configurações dos relés de proteção, e o monitoramento em tempo real da troca de informações entre os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs), com capacidade de resposta inferior a 1/4 de ciclo.

## Desafios e Soluções

Apesar dos avanços tecnológicos recentes, a digitalização e a integração de energias renováveis ao sistema elétrico enfrentam desafios substanciais. Questões como a modernização da infraestrutura existente, a garantia de segurança cibernética e a gestão eficaz da intermitência das fontes renováveis emergem como pontos críticos a serem abordados. Soluções inovadoras, incluindo armazenamento de energia, implementação de redes inteligentes e desenvolvimento de algoritmos de previsão avançados, são fundamentais para superar tais obstáculos.

Especificamente, no contexto do sistema elétrico brasileiro, observa-se uma necessidade estrutural de expansão das linhas de transmissão (LT), essenciais para o escoamento eficiente da energia gerada em complexos renováveis para os grandes centros de consumo. A insuficiência deste mecanismo de transporte pode acarretar restrições sistêmicas de potência ativa, devido à necessidade do controle de frequência do Sistema Interligado Nacional (SIN), sobretudo em períodos de menor demanda, como finais de semana e feriados.

Um desafio técnico adicional é a ausência de inércia física. Embora possam responder rapidamente à flutuações na rede, a falta de inércia física dos inversores não oferece o mesmo suporte dinâmico proporcionado por geradores síncronos. Quanto ao suporte de tensão, os inversores, apesar de poderem fornecer, geralmente necessitam de estratégias de controle adicionais para contribuir efetivamente.

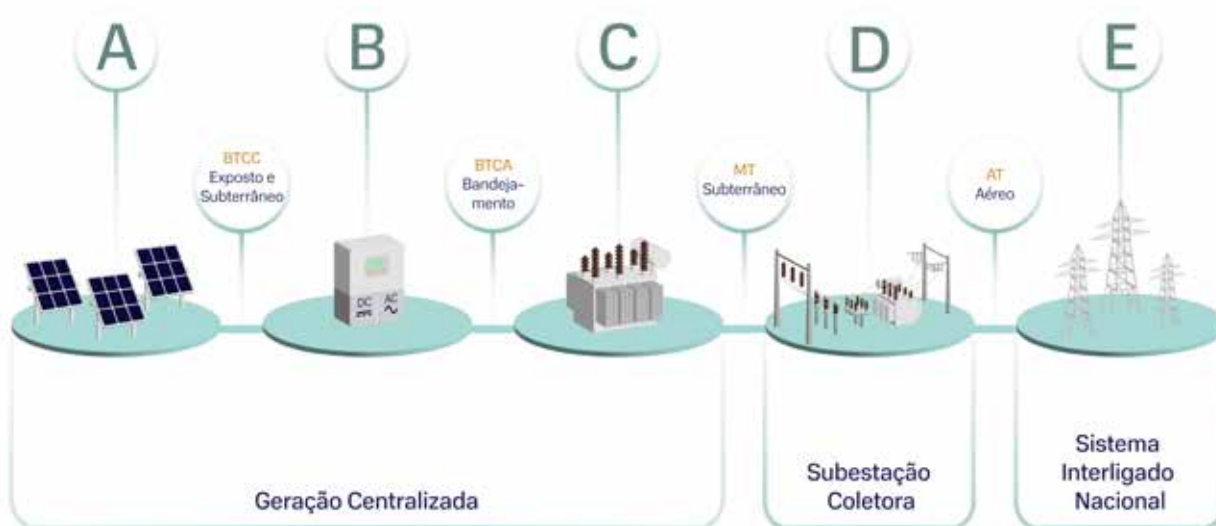


Figura 1

Para enfrentar esses desafios, é indispensável o cumprimento dos padrões definidos no Submódulo 3.6 - “Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão às Instalações de Transmissão” do ONS. O Capítulo 8 deste submódulo, em particular, especifica os requisitos mínimos para a conexão de centrais geradoras eólicas e fotovoltaicas, abordando aspectos como variação de tensão em regime permanente, instabilidade de tensão, sistemas de proteção, registro de perturbações, suportabilidade dinâmica e injeção de corrente reativa sob condições de defeito. Estes requisitos são essenciais para assegurar uma integração segura e eficiente destas centrais ao sistema de transmissão, mantendo a estabilidade e a confiabilidade da rede elétrica, especialmente no gerenciamento de fenômenos como variações de tensão e instabilidades.

### Impacto Ambiental e Sustentabilidade

O impacto ambiental resultante da digitalização e da adoção de energias renováveis tem se mostrado notavelmente benéfico. Uma das contribuições mais significativas dessas iniciativas é a redução das emissões de carbono, um grande passo na mitigação das mudanças climáticas. Além disso, a crescente independência de combustíveis fósseis, em favor de fontes renováveis, representa uma transformação vital para a sustentabilidade ambiental de longo prazo. Adicionalmente, a eficiência operacional promovida pela digitalização no setor energético permite uma gestão mais racional e otimizada dos recursos. Isso não apenas contribui para a diminuição do impacto ambiental, mas também assegura uma utilização mais eficiente da energia, maximizando o potencial das fontes renováveis e reduzindo o desperdício.

### 3 - APLICAÇÃO

Durante a etapa de projetos para construção de um novo empreendimento, diversas tecnologias e topologias podem ser definidas, nesse artigo adotaremos a geração centralizada de grande porte com conexão na rede base. A fim de garantir um melhor entendimento por parte do leitor, todo o contexto será baseado em um diagrama típico real apresentado na Figura 1, ilustrando a geração de energia solar centralizada conectada a uma subestação coletora de 230 kV.

Neste contexto tem-se as seguintes representações:

- A: Placas fotovoltaicas;
- B: Inversor Solar;
- C: Transformador de média tensão;
- D: Subestação Coletora;
- E: Sistema Interligado Nacional;

A geração centralizada é representada pelos blocos “A, B e C”, sendo eles:

• **Placas solares** - Conjunto de placas solares interligadas em série e paralelo de forma a obter o nível de tensão e corrente definidos no projeto.

• **Inversor solar** - Equipamento que emprega eletrônica de potência sendo capaz de transformar a corrente contínua (C.C) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (C.A) em baixa tensão (< 1000 V).

• **Transformador de média tensão** - Equipamento utilizado para adequar o nível de tensão gerado pelos inversores, permitindo o escoamento da energia em média tensão (34,5 kV) até a subestação coletora.

A Subestação coletora “D” tem por finalidade receber a energia gerada em cada subparque e elevá-lo para alta tensão (230 kV) de forma a transmitir até o bay de conexão existente na subestação da concessionária de energia “E”.

Entre os pontos “A” e “B”, são utilizados cabos PV expostos que conectam as placas solares e são interligados a uma caixa denominada strigbox. Após a strigbox, são empregados cabos de baixa tensão diretamente enterrados até a entrada CC do inversor solar.

A saída CA do inversor solar “B” é conectada ao transformador “C” de 0,69/34,5 kV, através de cabos de baixa tensão abrigados em bandejamento. Já o “lado de alta” do transformador “C”, é interligado com o disjuntor da subestação coletora “D” utilizando cabo de média tensão diretamente enterrado.

Por fim, a saída “D” em 230kV da subestação coletora é conectada à subestação da concessionária “E” representada pelo SIN.

### 4 - PRÓXIMO ARTIGO

*Artigo II - Subestações Digitais: Implementação da Norma IEC 61850 e Seletividade Lógica em Subestações Coletoras*

O artigo II focará na evolução das subestações elétricas para o padrão digital, com especial atenção à implementação da norma IEC 61850 na subestação coletora designada como “D” e sua interação com o SIN, identificado como “E” na Figura 1.

Um aspecto central deste estudo é a demonstração prática do uso da seletividade lógica por meio de mensagens GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*), estabelecendo uma comunicação rápida entre a geração centralizada “C” e a subestação coletora “D”. A aplicação real analisada ilustra como a seletividade lógica reduz o tempo de atuação em situações críticas, melhorando a segurança e estabilidade da rede elétrica.

### 5 - AGRADECIMENTO

Agradecimento especial a minha esposa, Keli Antunes pela revisão do conteúdo e confecção das imagens.