

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 4

Comissionamento de centrais geradoras fotovoltaicas

Por Paulo Henrique Vieira Soares e *Carolina Reis Silva

1 - INTRODUÇÃO

O comissionamento de usinas fotovoltaicas é um processo crucial que assegura a operacionalidade e eficiência de tais instalações. Dividido em comissionamento a frio e a quente, cada fase desempenha funções específicas para validar a segurança e desempenho dos sistemas envolvidos. O comissionamento a frio verifica os aspectos de segurança e conformidade técnica sem necessidade de energia ativa, enquanto o comissionamento a quente confirma a capacidade operacional sob condições reais de carga.

O comissionamento começa com o isolamento e sinalização da área para acesso controlado. É essencial inspecionar o sistema para conformidade com o projeto e segurança, incluindo a verificação de circuitos, conexões e aterramento. Antes da energização, é crucial avaliar se os padrões de proteção elétrica e segurança foram cumpridos. Os testes devem ser conduzidos na:

- 1 - Usina Fotovoltaica
- 2 - Subestação Elevadora/Coletora
- 3 - Linha de Transmissão
- 4 - Subestação Transmissora

Este artigo foca nos testes da Usina Fotovoltaica, uma área emergente, diferentemente dos itens 2 a 4, que são bem estabelecidos. Os subsistemas em foco são aterramento, módulos solares, rastreadores e inversores conforme Figura 1.

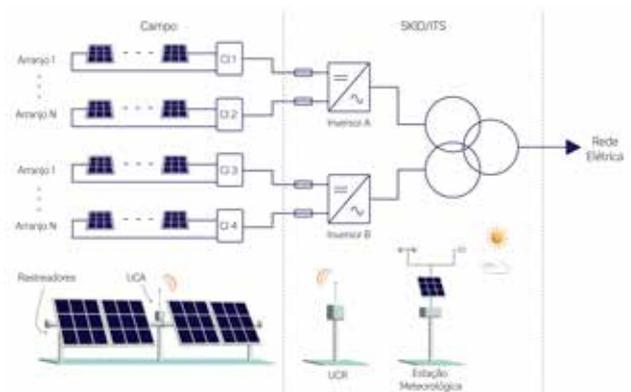


Figura 1 - SKID de geração

Após as verificações iniciais, é viável começar os testes usando apenas a alimentação auxiliar dos equipamentos. Frequentemente, o projeto ainda está em andamento nesta fase, e geradores podem ser empregados para energizar o sistema e prosseguir com as atividades em campo.

2 - COMISSONAMENTO A FRIO

Durante o comissionamento a frio de uma usina fotovoltaica, uma série de testes são conduzidos sem a necessidade de energização do sistema. Isso inclui a verificação da integridade estrutural, a instalação correta e a segurança dos equipamentos. Testes de continuidade asseguram a conexão adequada entre os módulos e o sistema de aterramento, enquanto testes de polaridade confirmam a correta instalação elétrica dos componentes. Além disso, verificações visuais e ensaios específicos como o de resistência de isolamento são realizados para garantir que não existam falhas de isolamento que possam afetar o desempenho ou a segurança da usina.

Aterramento

Inicialmente, é crucial assegurar a conexão de todos os módulos e rastreadores ao sistema de aterramento, o que deve ser verificado por testes de continuidade. Em situações em que o uso de um multímetro não se mostra eficiente para tal medição, a aplicação de um microhmímetro é aconselhada.

No SKID ou ITS (Inverter and transformer Station), que abriga o transformador, inversores centrais, o controlador dos rastreadores e o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), deve existir um sistema de equipotencialização. Este sistema assegura a interconexão da malha de aterramento dos rastreadores e caixas de junção com os demais componentes da estação. A verificação da continuidade dentro deste sistema e sua conexão com outros sistemas é imprescindível. Adicionalmente, dada a presença de circuitos de média tensão e o acesso frequente à área, é imperativo a realização de ensaios de passo e toque para garantir a segurança.

No contexto da resistência de aterramento em usinas fotovoltaicas, a ausência de diretrizes normativas específicas complica a padronização dos procedimentos. Considerando a

extensa área que essas instalações ocupam, realizar ensaios em todo o parque não é viável. Contudo, é possível executar esses testes na área da ITS, isolando-a por meio da caixa de equipotencialização. Os valores obtidos nessa medição servirão como referência para intervenções futuras, garantindo uma base consistente para a manutenção da integridade do sistema de aterramento.

Módulos e Caixa de junção

O comissionamento de campo para módulos solares é regido pela norma ABNT NBR 16274, a qual estabelece diretrizes para os ensaios realizados no arranjo fotovoltaico. Tal arranjo consiste em um agrupamento de módulos conectados em série e interligados à caixa de junção, garantindo a conformidade técnica e operacional do sistema.

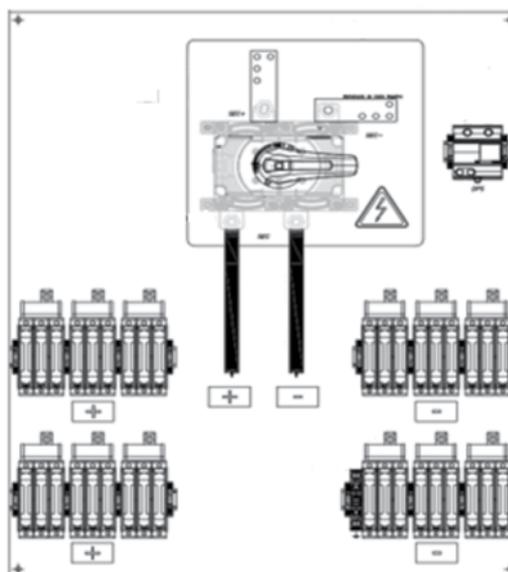


Figura 2 - Vista interna de uma Caixa de junção

Tabela 1 - Medição de continuidade (Relatório de aterramento)

Item	Ponto de Origem		Ponto de Destino		Leitura R (mΩ)	Parecer
	Área	Descrição	Área	Descrição		
1	SKID	Barra de Equalização	SKID	Trocador de calor	79,70	Conforme
2	SKID	Barra de Equalização	SKID	UCR-01	57,00	Conforme
3	SKID	Barra de Equalização	SKID	UCR-02	68,90	Conforme
4	SKID	Barra de Equalização	SKID	UCR-03	67,00	Conforme
5	SKID	Barra de Equalização	SKID	Barra do SKID	83,60	Conforme
6	SKID	Barra de Equalização	SKID	Para-raio 01	94,50	Conforme
7	SKID	Barra de Equalização	SKID	Para-raio 02	48,30	Conforme
8	SKID	Barra de Equalização	SKID	Escada SKID	90,00	Conforme
9	SKID	Barra de Equalização	SKID	Leito Cabos	54,60	Conforme
10	SKID	Barra de Equalização	SKID	Transformador	78,20	Conforme

Os ensaios previstos para os arranjos incluem:

- **Polaridade:** verificação em todos os cabos de corrente contínua para assegurar a conexão adequada dos equipamentos, baseando-se na tensão entre polos.
- **Caixa de Junção:** avaliação para confirmar conexões corretas e a funcionalidade das seccionadoras e fusíveis.
- **Corrente de Curto-Circuito:** medição em cada circuito para identificar possíveis falhas nos cabos.
- **Corrente de Operação:** análise em cada circuito quanto à sua funcionalidade, comparando valores medidos com os esperados.
- **Tensão de Circuito Aberto:** checagem em cada circuito para confirmar a quantidade e conexão correta dos módulos.
- **Resistência de Isolamento:** garantia da isolação adequada dos módulos e condutores, podendo ser realizada individualmente em cada série de módulos.

É importante destacar que, devido à natureza inerente das fontes energéticas, não é possível isolar completamente os circuitos para testes. Isso implica que as medições de resistência de isolamento podem ser afetadas pela direção da corrente gerada pelo módulo em relação à corrente de teste. Especificamente, medições entre o eletrodo positivo e o terra podem subestimar a resistência real, enquanto medições entre o eletrodo negativo e o terra podem superestimá-la. Assim, uma avaliação empírica torna-se necessária, esperando-se que resistências de isolamento de circuitos similares sem falhas alcancem valores próximos. Tal avaliação exige considerável experiência por parte do executor.

Tabela 2 - Relatório de Ensaios de Categoria 1 – Medições de Resistência de Isolamento.

Temperatura (°C): 37,9		Umidade (%): 35		Parecer
Open-circuit Voltage (Voc) = 49,54				
Short-circuit Current (Isc): 13,63 A				
Arranjo	Voc (V)	Ensaio de Megger do Arranjo (MΩ)		
		P (+)	N (-)	
1	1346	17,2	20,2	Conforme
2	1347	17,2	20,2	Conforme
3	1343	17,2	20,2	Conforme
4	1341	17,2	20,2	Conforme
5	1342	17,2	20,2	Conforme
6	1340	17,2	20,2	Conforme
7	1356	17,2	20,2	Conforme
8	1347	17,2	20,2	Conforme

Uma alternativa mais precisa, conforme norma, envolve o curto-circuito dos terminais positivos e negativos em relação à terra. Entretanto, essa abordagem apresenta um risco elétrico elevado para o

executor, sendo recomendada a sua realização noturna para minimizar tais riscos.

Rastreadores Solar

O comissionamento dos rastreadores é uma responsabilidade exclusiva do fabricante, devido a questões de garantia. O sistema inclui Unidades Controladoras Autônomas (UCA) em cada suporte de módulo, Unidades Controladoras de Rede (UCR) para cada SKID/ITS, estações de meteorologia para o monitoramento perimetral e um servidor para suporte remoto do fabricante, abrangendo todo o projeto. A quantidade de equipamentos varia conforme a escala do projeto. O processo inicia-se pela identificação individual de cada UCA, associando-a à UCR correspondente, que configura e controla o rastreamento. Esta comunicação, geralmente sem fio (Protocolo Zigbee), é testada para assegurar a execução correta dos comandos, incluindo um “teste de giro” que verifica a resposta dos rastreadores.

Além disso, as estações solarimétricas são responsáveis por monitorar a velocidade e direção do vento, essenciais para posicionar os módulos na “posição de segurança” em caso de ventos fortes. Estas estações são distintas das usadas para fornecer dados ao Operador Nacional do Sistema (ONS). Antes dos testes de vento, é crucial que a usina tenha a alimentação auxiliar e a rede de comunicação estabelecidas. Após os testes, ajustes finais são feitos na angulação dos rastreadores para evitar sombreamento nos módulos, considerando as características do terreno. Finalmente, um arquivo de configuração “como construído” é atualizado no software e no servidor do fabricante, permitindo o acesso remoto a todos os dados dos equipamentos, concluindo o comissionamento.

Inversores

O comissionamento de inversores em usinas fotovoltaicas geralmente é efetuado pelos fabricantes devido à complexidade e especificidade técnica desses dispositivos. Dada a importância crítica e o alto valor dos equipamentos, envolver “terceiros” no comissionamento pode introduzir riscos adicionais. O processo de comissionamento inicia-se com a inspeção do sistema de troca de calor e o reaperto das conexões elétricas, que podem ser afetados durante o transporte e armazenamento. Posteriormente, realiza-se uma série de verificações, medições e testes em subsistemas como o trocador de calor, nobreak e sistema de incêndio, se presentes, além de realizar ajustes funcionais e calibrações conforme necessário. É crucial, nessa fase, configurar e validar a comunicação e os pontos digitais para garantir a execução remota de leituras e comandos durante os testes de carga subsequentes.

3.0- COMISSONAMENTO A QUENTE

No comissionamento a quente, o sistema é testado sob condições operacionais plenas, o que inclui a geração e distribuição de energia. Esta fase verifica se a usina atende aos requisitos de desempenho esperados e se comporta adequadamente sob carga. Testes de geração

Transformador **145 kV** **TRIFÁSICO**



5/6,25 MVA

Para atender demandas de alta tensão com máxima eficiência e confiabilidade, este **Transformador Trifásico de 5000/6250 kVA** possui tensão primária de 145.000 até 132.000, é produzido com enrolamentos de cobre de alta qualidade e 8.350 litros de óleo mineral em seu isolamento.

Este modelo de transformador é ideal para aplicações industriais e utilitárias pois garante estabilidade à rede elétrica e mais qualidade para a energia.

ENTRE EM CONTATO E SOLICITE UM ORÇAMENTO



+55 16 3263 9400

Av. Sérgio Abdul Nour, 2106
Distrito Ind. II, 14900-271
Itápolis, São Paulo, Brasil.

ITAIPU
TRANSFORMADORES

www.itaiputransformadores.com.br



ISO 14001 ISO 45001 ISO 9001

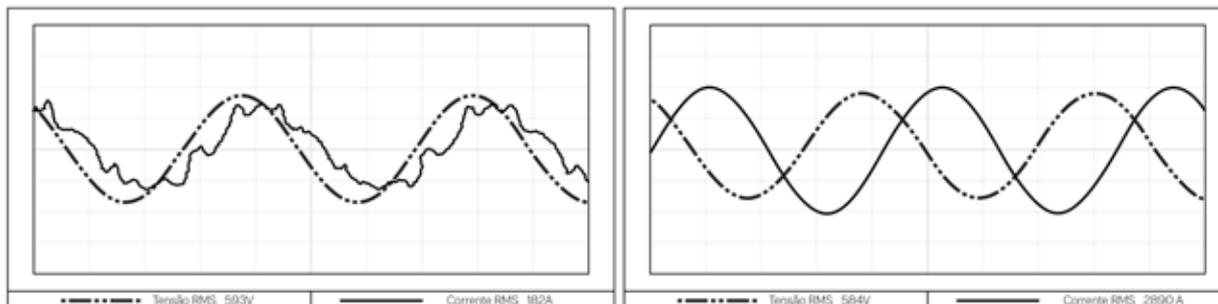


Figura 3 - Qualidade da corrente CA em baixa potência (esquerda) e potência nominal (direita).

de energia, ajustes de inversores e verificação da qualidade da energia produzida são alguns dos aspectos avaliados. Esta etapa também envolve a interface com órgãos de regulamentação para garantir que a usina esteja em conformidade com todas as normas e regulamentos aplicáveis antes de iniciar a operação plena.

É essencial que o sistema de geração esteja completamente finalizado e as condições climáticas, particularmente a incidência solar, devem ser favoráveis durante os testes, dada a dependência da energia solar como fonte de geração. Adicionalmente, é crucial obter a autorização do Operador Nacional do Sistema (ONS) para iniciar os testes de geração. Caso a usina esteja conectada à rede do Sistema Interligado Nacional (SIN), é necessário cumprir determinados requisitos para adquirir a Declaração de Atendimento aos Procedimentos de Rede para operação em teste (DAPR/T) e, conseqüentemente, a autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para despacho da energia.

Inversores

Durante o comissionamento, a “certificação” dos cabos de geração é crucial. Inversores contêm dispositivos de monitoramento de isolamento que bloqueiam a entrada em operação se a resistência de isolamento estiver abaixo do limite configurado. Assim, uma baixa isolamento em qualquer ponto do sistema pode impedir que o inversor alcance sua capacidade total. Além disso, conforme a NBR 16149, o inversor necessita de uma tensão de referência da rede para operar, uma exigência conhecida como proteção anti-ilhamento.

Na ausência de impedimentos, procede-se às validações operacionais do inversor, envolvendo potência ativa e reativa. Uma vez ativados os conversores, tensões e correntes são inspecionadas, e a qualidade da energia produzida é avaliada por meio de medições fasoriais e oscilografias para identificar distorções causadas pelos inversores conforme Figura 3.

Para otimizar a eficiência, inversores utilizam a tecnologia MPPT (Maximum Power Point Tracking), que ajusta automaticamente o equipamento para operar no ponto de máxima potência, com base na tensão de entrada CC. Se a tensão cair abaixo do mínimo operacional, por exemplo, devido a uma redução na irradiância solar, o inversor entra em

modo de espera. Adicionalmente, os inversores podem “gerir” a potência reativa para controlar a tensão da rede à noite, diminuindo a necessidade de bancos de capacitores na subestação elevadora. Esse controle reativo é geralmente limitado a alguns inversores para balancear a demanda e minimizar o desgaste. Com os inversores em funcionamento, os testes operacionais subsequentes da usina podem prosseguir.

Termografia

A termografia é uma ferramenta valiosa na inspeção de módulos solares e conexões, mas requer configurações precisas do equipamento, incluindo resolução da câmera, faixa de temperatura e precisão de medição. Para resultados confiáveis, é essencial ajustar corretamente os parâmetros como emissividade, distância ao objeto e temperatura ambiente, que variam conforme o objeto e as condições ambientais. Durante o ensaio, as normas exigem que os módulos operem normalmente, sob condições de irradiância superiores a 600W/m² e em clima estável, sem vento, chuva forte ou nuvens significativas para evitar variações de corrente que afetem os resultados. Variações na temperatura dos módulos indicam funcionamento anormal, podendo apontar para “pontos quentes” causados por defeitos ou sombreamento, que necessitam de investigação.

Para grandes usinas, inspeções termográficas aéreas via drones são práticas, porém podem fornecer “apenas” uma visão geral devido à limitação na resolução das imagens. Áreas suspeitas identificadas nesta inspeção preliminar devem ser examinadas mais de perto em inspeções terrestres. Além dos módulos, é crucial realizar termografia terrestre em caixas de junção, conexões, inversores e transformadores para identificar potenciais sobreaquecimentos em seccionadoras, disjuntores, portafusíveis e conexões, prevenindo perdas materiais e interrupções no sistema de geração.

Curva I x V

O ensaio com o traçador de curva IxV é essencial em usinas fotovoltaicas de grande escala para verificar a integridade dos arranjos, identificando defeitos ou sombreamentos. Utilizando esse equipamento e acessórios apropriados, é possível mensurar temperatura, irradiância, corrente, tensão e potência. Essas medições,

BR6

Uro abrigado

Painel Compacto SF6 até 36kV

Testado conforme NBR IEC 62271-200

Uro ao tempo



G2 SLIM

Uro abrigado

Painel isolado à AR até 17,5kV

Testado conforme NBR IEC 62271-200

Uro ao tempo



ACESSE AQUI!
DESENHOS TÉCNICOS INIVIDUALIZADOS



BRVAL

ELECTRICAL

Atendimento ao Cliente | Vendas:

Av. Pastor Martin Luther King Jr, 126 Bl. 09 Torre 2 - Salas 1108 a 1111
Del Castilho (Shopping Nova América Condomínio Offices) - Rio de Janeiro - RJ
CEP 20.765-000 | ☎ 21 3812-3100 | ☎ 21 97105-6853 | vendas@brval.com.br

Fábrica Sede:

Rodovia RJ 145, nº 27.295 - Canteiro - Valença - RJ
CEP 27.605-034 | 24 2453-5004 | 2453-5394 | sac@brval.com.br

Nova Unidade SP:

Rua Ribeirão Preto, nº 46 - Jardim Leocádia - Sorocaba - SP
CEP 18.085-380 | 15 3327-3866 | 15 99243-1717 | brvalsrj@brval.com.br

✉ vendas@brval.com.br | 🌐 www.brval.com.br | 📞 📱 🌐 brvalelectrical

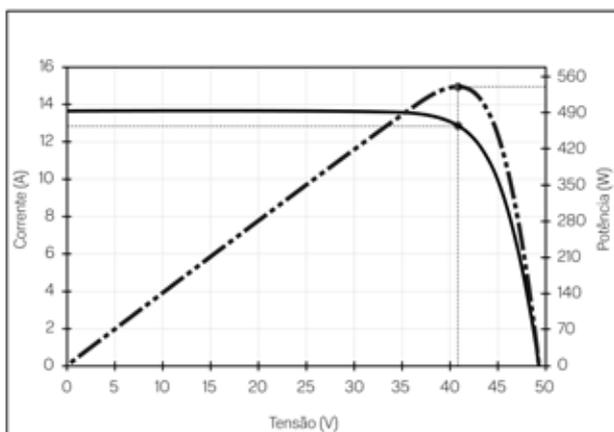
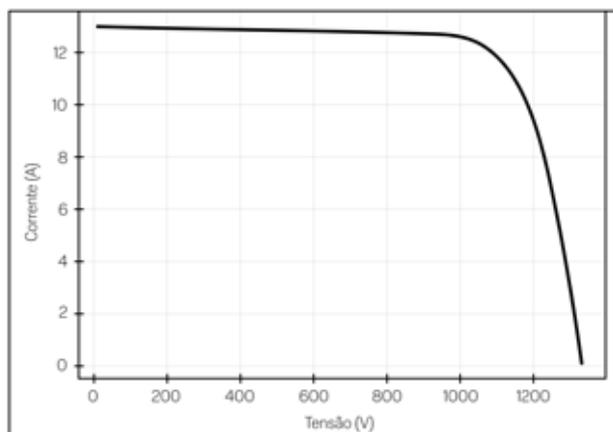


Figura 4 - Curva IxV, gráfico esperado (unidade) e medido (Série)



combinadas com as especificações dos módulos solares, permitem normalizar os resultados para as Condições Padrão de Teste (STC), facilitando a comparação com os valores e gráficos esperados, assegurando a conformidade dos arranjos.

Para a realização do ensaio, conforme a NBR 16274, é necessário que os módulos permaneçam em rastreamento, quando aplicável, posicionados em um ângulo máximo de $\pm 22,5^\circ$ em relação ao sol, sob irradiância direta e superior a 700W/m^2 . A presença de sujeira nos módulos pode afetar os resultados, sendo recomendada a limpeza prévia dos módulos. Durante o ensaio, o traçador de curva realiza rapidamente a leitura dos parâmetros e a elaboração da curva IxV. A norma também detalha os desvios típicos que podem ser observados na curva, fornecendo insights sobre possíveis falhas e suas causas subjacentes.

Caso a curva não apresente nenhum dos desvios indicados na norma, avalia-se os parâmetros medidos com os valores STC fornecidos.

Se os valores medidos não excederem a tolerância especificada pelo fabricante do módulo, considerando também a precisão do traçador de curva, as séries de módulos são consideradas aprovadas. Este procedimento precisa ser executado em cada série ou arranjo fotovoltaico da usina. A obtenção de resultados satisfatórios em todos os ensaios indica que o sistema está devidamente qualificado e pronto para a operação.

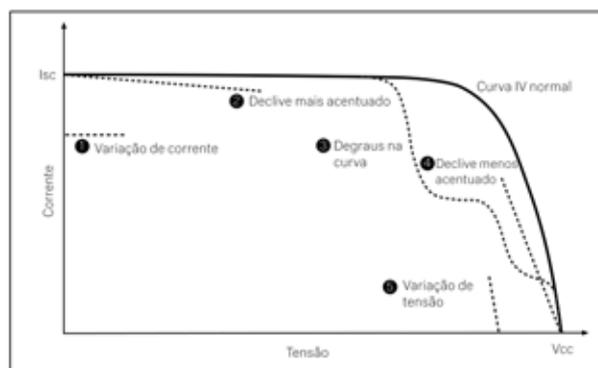


Figura 5 – Exemplo de Curva IxV de referência prevista na NBR 16274

4.0 - PRÓXIMOS ARTIGOS

O Artigo V explorará os sistemas SCADA e PPC aplicados no monitoramento e controle das usinas fotovoltaicas de grande porte. Serão abordados exemplos práticos de aplicação e melhores práticas adotadas para otimização da operação remota e segura do complexo.

Tabela 3 - Dados de placa e dados de Medição de curva IxV

Condições Climáticas		Módulo Solar (Série de 30 módulos)		
Parâmetro	Unidade	Parâmetro	STC	Medição
Irradiância	916W/m^2	Potência Máxima (Pmáx)	15.900 Wp	13.204 Wp
Temperatura ambiente	$33\text{ }^\circ\text{C}$	Tensão de Máxima Potência (Vmp)	1.226,1 V	1.079,13 V
Umidade	29%	Corrente de Máxima Potência (Imp)	12,97 A	12,24 A
Clima	Seco	Tensão de Circuito Aberto (Voc)	1.484,40 V	1.333,05 V
Temperatura do módulo	$54\text{ }^\circ\text{C}$	Corrente de Cuito-circuito (Isc)	13,73 A	13,05 A

Ilustrações - Keli Antunes

*Carolina Reis Silva é engenheira eletricista, formada pela PUC-MG. Atua na implantação de subestações de energia desde 2014 e parques solares de geração centralizada desde 2017, com vivência nos processos de montagem e comissionamento de sistemas elétricos e participação em projetos executivos.

