

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU EM SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS ISOLADOS E CONECTADOS À REDE  
ELÉTRICA**

Uma avaliação sobre teste de desempenho em  
usinas fotovoltaicas de grande porte

**Paulo Henrique Vieira Soares**

Viçosa, Setembro de 2023

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU EM SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS ISOLADOS E CONECTADOS À REDE  
ELÉTRICA**

**Paulo Henrique Vieira Soares**

**Uma avaliação sobre teste de desempenho em  
usinas fotovoltaicas de grande porte**

Trabalho Final Submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Especialista em Sistemas Fotovoltaicos Isolados e Conectados à Rede Elétrica.

**Área de Concentração: Grupo A**

**Orientador: Prof. Heverton Augusto Pereira**

**Setembro de 2023**

**Viçosa**

*“Revelemo-nos, mais por atos do que  
por palavras, dignos de possuir este grande  
País”* Theodomiro Santiago

# Resumo

O projeto Sol do Cerrado, um dos maiores parques de energia fotovoltaica da América Latina, possui potência instalada de 766 Megawatts-pico.

Durante sua concepção definiu-se o modelo de usina de geração centralizada. Este modelo destaca-se por ser uma prática de mercado que reduz o custo de implantação e o prazo de execução da obra. O empreendimento conta com 69 eletrocentros com potência nominal de 10,3 MVA cada.

Para montagem eletromecânica desta usina contratou-se uma empresa responsável pelo BOS (Balance of System), incluindo engenharia executiva, fornecimento, montagem e comissionamento.

Durante o projeto, diversos desafios precisam ser superados para que, ao final, o BOS entregue a usina gerando energia conforme previsto em projeto e garanta a performance da planta. Para validação do projeto e celebração dos marcos contratuais finais, após a construção, comissionamento e entrada em operação comercial, a contratante em acordo com o BOS realizou a contratação de uma empresa certificadora independente de forma a cancelar a aprovação ou não da UFV (Usina Fotovoltaica) em análise conforme critérios pré-definidos e acordados anteriormente entre as partes. O Teste de Desempenho tem por função avaliar a performance operacional da usina fotovoltaica. Seus resultados refletem o desempenho global da UFV, por meio do atingimento ou superação das expectativas de geração da energia esperada a partir do projeto, execução e operação da usina em teste.

Este trabalho aborda os desafios para avaliação do desempenho de unidades fotovoltaicas expondo os resultados, considerações e lições aprendidas durante os testes de uma das UFVs do projeto. A partir do exposto é proposta uma metodologia para execução do teste de performance.

**Palavras-chaves:** Performance, Geração, Energia, EPI, UFV.

# Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Mapa eletrogeográfico . . . . .	10
Figura 2.1 – Unifilar simplificado. . . . .	14
Figura 4.1 – Boxplot da irradiância global no plano horizontal. . . . .	27
Figura 4.2 – Boxplot da irradiância no plano inclinado. . . . .	27
Figura 4.3 – Boxplot da temperatura dos módulos. . . . .	28
Figura 4.4 – Desempenho Dia 3 (Energia medida - Esperada). . . . .	29
Figura 4.5 – Desempenho Dia 10 (Energia medida - Esperada). . . . .	30
Figura 4.6 – Desempenho Dia 15 (Energia medida - Esperada). . . . .	32
Figura 4.7 – <i>Setpoint</i> de potência. . . . .	33
Figura 4.8 – Desempenho no período. . . . .	35
Figura 4.9 – Histograma de Energia Gerada em kWh. . . . .	36
Figura 4.10–Desempenho no período. . . . .	37
Figura 4.11–Formulário do checklist pré-performance . . . . .	39
Figura 4.12–Fluxograma macro do processo de avaliação de desempenho. . . . .	40
Figura 4.13–Informativo para início do teste de performance . . . . .	42
Figura 4.14–Informativo para acompanhamento do teste de performance . . . . .	44

# Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Sumário do teste de desempenho. . . . .	26
Tabela 4.2 – Sumário Dia 3. . . . .	29
Tabela 4.3 – Sumário Dia 10. . . . .	31
Tabela 4.4 – Sumário Dia 15. . . . .	32
Tabela 4.5 – Alteração de <i>setpoint</i> . . . . .	34
Tabela 4.6 – Restrição sistêmica . . . . .	34
Tabela 4.7 – Protocolos de comissionamento . . . . .	38
Tabela 4.8 – Matriz de comunicação . . . . .	41

# Lista de abreviaturas e siglas

BOS	<i>Balance of System</i>
CA	<i>Corrente Alternada</i>
CC	<i>Corrente Contínua</i>
CFTV	<i>Circuito Fechado de TV</i>
EPI	<i>Energy Performance Index</i>
EPC	<i>Engineering, Procurement and Construction</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MVA	<i>Mega Volt Ampere</i>
MW	<i>Mega Watt</i>
MW <sub>p</sub>	<i>Mega Watt pico</i>
MWh	<i>Mega Watt hora</i>
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema</i>
O&M	<i>Operação e Manutenção</i>
PPC	<i>Power Plant Controller</i>
RDO	<i>Relatório Diário de Obra</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SPDA	<i>Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas</i>
SIN	<i>Sistema Interligado Nacional</i>
TA	Tecnologia da Automação
TI	Tecnologia da Informação
TO	Tecnologia Operacional
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	Objetivos	12
1.2	Estrutura do trabalho	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>14</b>
2.1	Considerações iniciais	14
2.2	Módulos fotovoltaicos	14
2.3	Rastreadores solares	14
2.4	Inversores	15
2.5	Unidade geradora	15
2.6	Subestações unitárias	15
2.7	Subestação coletora/elevadora	16
2.8	Linha de transmissão e conexão com a rede básica	16
<b>3</b>	<b>TESTE DE DESEMPENHO</b>	<b>17</b>
3.1	Considerações iniciais	17
3.2	Procedimento e metodologia	17
3.3	Métrica	17
3.4	Responsabilidade e definições	18
3.5	Limpeza dos sensores de irradiação	20
3.6	Tratamento dos dados	20
3.7	Tabela de horários de execução do teste	20
3.8	Tabela de horários de execução do teste	21
3.9	Pré-teste	21
3.10	Modelo Computacional	22
3.11	Requisitos para início do teste de desempenho	23
3.12	Manutenções e intervenções	23
3.13	Certificados	23
3.14	Sistema SCADA	24
3.15	Disponibilização dos dados	24
3.16	Exclusão de dados	24
3.17	Relatório de conclusão	24
3.17.1	Aprovação do teste de performance	25
3.17.2	Reprovação do teste de performance	25
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>26</b>

<b>4.1</b>	<b>Considerações iniciais</b>	<b>26</b>
4.1.1	Irradiância global no plano horizontal	27
4.1.2	Irradiância no plano dos módulos	27
4.1.3	Temperatura dos módulos	28
<b>4.2</b>	<b>Avaliação</b>	<b>28</b>
4.2.1	Dia de teste - 3	28
4.2.2	Dia de teste - 10	29
4.2.3	Dia de teste - 15	31
<b>4.3</b>	<b>Dia de teste - Excluído</b>	<b>32</b>
<b>4.4</b>	<b>Resultado do teste de desempenho</b>	<b>35</b>
4.4.1	Histograma de energia	36
4.4.2	Energia medida <i>versus</i> Irradiância	36
<b>4.5</b>	<b>Lições aprendidas</b>	<b>37</b>
4.5.1	Protocolos de comissionamento a frio e a quente	37
4.5.2	Checklist pré-performance	38
<b>4.6</b>	<b>Fluxograma macro</b>	<b>40</b>
<b>4.7</b>	<b>Matriz de comunicação</b>	<b>41</b>
4.7.1	Proposta de informativo D-3 (Início do teste)	41
4.7.2	Proposta de informativo S-1 e M-1 (EPI e relatório final)	43
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>45</b>
5.1	Conclusões Gerais	45
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>47</b>

# 1 Introdução

O Sol do Cerrado é um dos maiores parques de energia fotovoltaica da América Latina, com potência instalada de 766 Megawatts-pico, o equivalente ao consumo de uma cidade de 800 mil habitantes. O empreendimento representa 16% de toda a energia consumida pela Vale no Brasil (VALE, 2022). Durante a concepção do projeto definiu-se o modelo de usina de geração centralizada, logo o empreendimento conta com 69 eletrocentros com potência nominal de 10,3 MVA cada. Esse modelo se destaca por ser uma prática de mercado que reduz o custo de implantação e o prazo de execução da obra, além de propiciar um ambiente mais limpo com menor quantidade de equipamentos.

O projeto está instalado no norte do Estado de Minas Gerais a aproximadamente 15 quilômetros da SE Jaíba 230 kV. A Figura 1.1 apresenta o mapa eletrogeográfico da região da SE Jaíba.

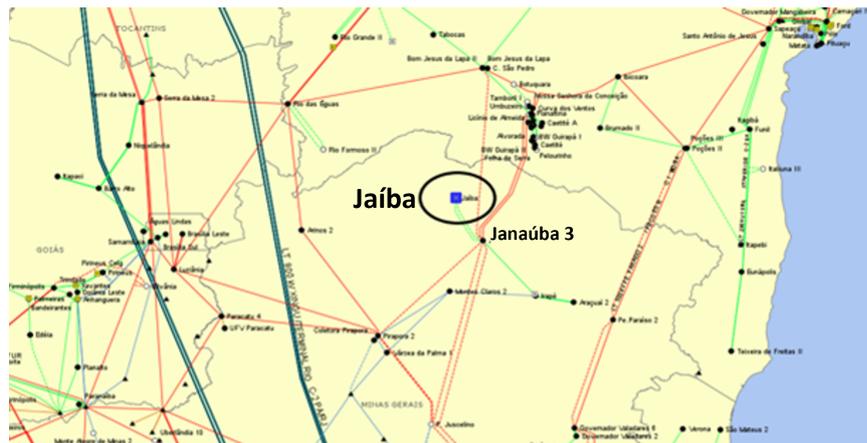


Figura 1.1 – Mapa eletrogeográfico

A usina solar possui 17 subparques em uma área equivalente à cerca de 1,3 mil campos de futebol com capacidade de geração de 766 MWp (CC) e 681 MWh (CA). O projeto conta com 1.431.900 módulos fotovoltaicos instalados em 15.910 rastreadores solares que por sua vez estão conectados aos 138 inversores de 5,196 MVA. O conjunto de 2 inversores associados à 1 transformador de 10,3 MVA forma a instalação denominada ITS (inversor transformador solar), sendo um total de 69 ITSs no parque. A energia gerada nas ITS's são concentradas na subestação elevadora de 34,5kV/230kV por meio de 4 barramentos de 34,5 kV. Dois transformadores de 34,5-34,5kV/230kV com potência de 340 MVA cada escoam a energia através de 1 Linha de transmissão de 230 kV em circuito duplo até os bays de conexão na subestação Jaíba conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN).

Para montagem eletromecânica contratou-se uma empresa responsável pelo BOS

(*Balance of System*), incluindo engenharia executiva, fornecimento, montagem e comissionamento. No escopo do BOS, tem-se:

- Estudos: Geotécnicos de resistividade elétrica e térmica do solo, Levantamento topográfico e planialtimétrico e Estudo hidrológico;
- Engenharia: Projeto executivo civil e eletromecânico, Topografia, Gerenciamento de qualidade dos serviços de montagem e obras civis e Comissionamento;
- Obras Civis e Infraestrutura: Terraplanagem, drenagens, acessos internos, fundação das SEs Unitárias, valas subterrâneas para o cabeamento (CC/CA);
- Elétrica: Malha de aterramento, instrumentação da Estação Solarimétrica (Temperatura, umidade, velocidade do vento, pluviometria e irradiação) e Subestações Solarimétricas (Irradiação e temperatura), cabeamento de força, SPDA para as Subestações Unitárias etc);
- Serviços: fundações, escavação, cravamento de estacas metálicas, montagem dos módulos, lançamento de cabos e perfuração, e construção de valas;
- Fornecimento de equipamentos e serviços: Instalação do CFTV, Controle de Acesso, Backbone de TI e de TA dos parques, Backbone de TI dentro das áreas administrativas.

Durante o projeto, diversos desafios precisam ser superados para que, ao final, o BOS entregue a usina produzindo a energia conforme previsto em projeto, destaca-se: projeto inédito no portfólio da empresa; Estratégia de contratação (EPC x Pacotes segmentados) dentro do Capex aprovado; início das obra durante o período chuvoso em Jan/21; mão de obra local não qualificada; Ausência de infraestrutura no município; Pandemia do COVID 19; crise logística internacional; falta de insumos no mercado; licenciamento ambiental; obtenção das aprovações regulatórias para energização; risco geológico; solo não competente; e por fim a garantia de performance da planta.

Neste contexto, para validação do projeto e celebração dos marcos contratuais finais, após a construção, comissionamento e entrada em operação comercial, a contratante e o BOS realizam a contratação de uma empresa certificadora independente de forma a cancelar a aprovação ou não da UFV (Usina Fotovoltaica) em análise conforme critérios pré-definidos e acordados anteriormente entre as partes. O Teste de Desempenho tem por função avaliar a performance operacional da usina fotovoltaica e seus resultados refletem o desempenho global da UFV, por meio do atingimento ou superação das expectativas de geração da energia esperada a partir do projeto, execução e operação da usina em teste. Não são objetos do Teste de Desempenho a quantificação individualizada das parcelas de perdas e contribuições dos subsistemas que compõem a usina em teste.

O Teste de Desempenho determinará o EPI (*Energy Performance Index*) da usina em teste conforme critério definido e suportado pela norma IEC 61724 (IEC61724, 2021). Fazem parte da usina em teste as estruturas de seguimento solar, os módulos fotovoltaicos, todo o cabeamento que transporta a energia produzida, os equipamentos elétricos passivos ou ativos responsáveis pela operação e segurança da usina, os transformadores unitários (BT/MT) e os medidores de energia individuais de cada usina.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar os desafios para avaliação do desempenho de unidades fotovoltaicas e propor um roteiro mínimo para execução do teste de performance baseado nas principais lições aprendidas em uma das UFVs de um dos maiores parques de energia solar da América Latina, o Sol do Cerrado.

## 1.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho de pós graduação está dividido em cinco capítulos, anexos e referências bibliográficas.

- No capítulo 1 foram apresentados a introdução sobre o tema, os desafios e os objetivos do trabalho.
- No capítulo 2 tem-se a fundamentação teórica sobre o princípio de geração fotovoltaica abordando-se, de forma concisa, conceitos e definições presentes no critério de avaliação. Sistema de rastreamento solar, Inversor transformador solar, estação solarimétrica, sistema de medição, sistema SCADA, PPC e a estrutura de comunicação são apresentados neste capítulo.
- No capítulo 3 são apresentados os principais critérios para execução do teste de performance, a documentação inicial, relatório de comissionamento, organograma, bem como as principais rotinas do BOS e O&M a serem executadas durante o período de testes.
- No capítulo 4 são mostrados e analisados os resultados obtidos do teste de performance de uma UFV. As análises comparativas entre as respostas do modelamento e o acompanhamento diário realizado pela equipe de comissionamento seguido das lições aprendidas e do roteiro mínimo proposto para realização dos testes na outras 16 UFVs do complexo.

- No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões extraídas com o desenvolvimento deste trabalho de pós graduação, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Fundamentação teórica

### 2.1 Considerações iniciais

As características dos principais equipamentos, soluções típicas das unidades geradoras e arranjos necessários para construção do complexo fotovoltaico serão descritas a seguir. A Figura 2.1 apresenta o unifilar simplificado.

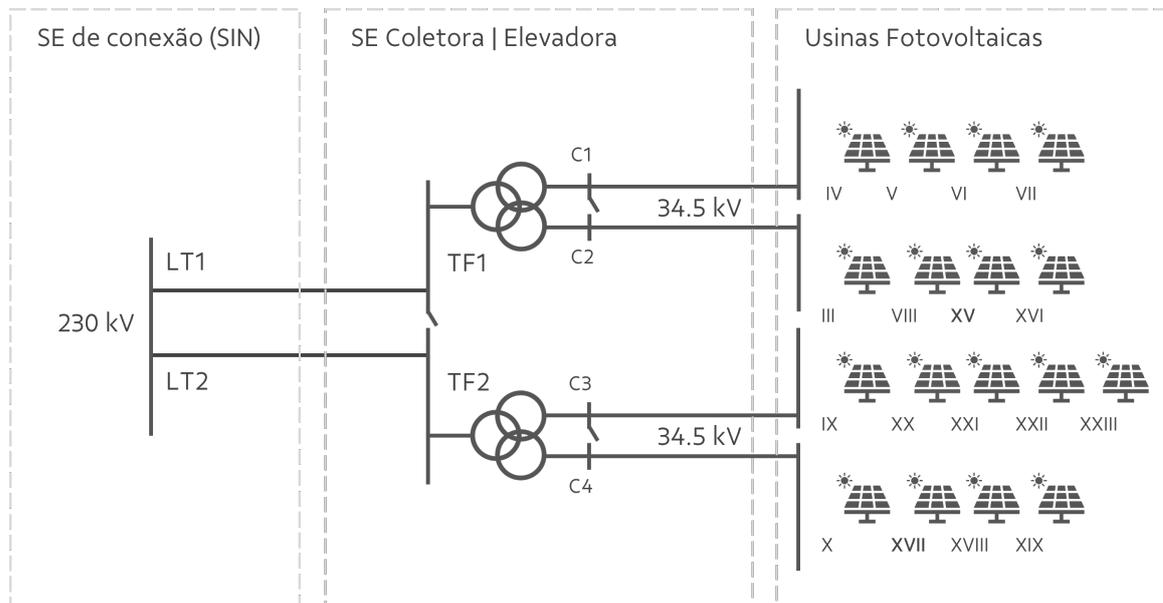


Figura 2.1 – Unifilar simplificado.

### 2.2 Módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são responsáveis pela conversão da irradiância solar incidente em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. São compostos por células fotovoltaicas de silício mono-cristalino tipo P bifaciais interligadas em série/paralelo a fim de produzir tensão e corrente suficientes para a produção de energia elétrica. No projeto foram aplicados três modelos diferentes (530W, 535W e 540W) de um único fabricante totalizando 1.431.900 módulos fotovoltaicos.

### 2.3 Rastreadores solares

A estrutura de suporte dos módulos fotovoltaicos é resistente às condições climáticas, dimensionada para suportar as tensões causadas pelos módulos e cargas adicionais causadas pelos ventos na região. Cerca de 16 mil rastreadores solares horizontais de eixo

único N-S foram instalados, 90 módulos fotovoltaicos por eixo e *pitch* (distância eixo a eixo) de 6 m.

## 2.4 Inversores

Os inversores instalados suportam tensão máxima de entrada de 1500 V em corrente contínua (CC) e 6.560 A a 40 °C. Cada inversores possui 20 entradas CC, conectadas a aproximadamente 114 rastreadores solares e 10260 módulos. O MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) trabalha na faixa de 1.005 – 1350 V e, na saída, o inversor entrega 4.937 kW de potência de saída, 4.130 A de corrente alternada (CA) máxima a 40 °C e tensão CA de 690 V.

## 2.5 Unidade geradora

Define-se como Unidade Geradora (UG) o arranjo fotovoltaico associado a um único inversor. O projeto conta com 6 tipos de arranjos, todos com potência de 4.937 kW, sendo 16 UGs de tipo 1, 12 UGs tipo 2 e 3, 70 UGs tipo 4, 16 UGs tipo 5 e 12 UGs tipo 6.

## 2.6 Subestações unitárias

O projeto contempla 69 subestações unitárias (também chamadas de eletrocentos ou ITS), sendo essas compostas por:

- Inversores fotovoltaicos;
- Transformador de potência;
- TPs (transformadores de potencial) e TCs (transformadores de corrente), painel de distribuição e disjuntores de circuitos;
- Sistema de proteção;
- Sistema de medição;
- Sistemas auxiliares;
- Conectores e isoladores para média tensão.

## 2.7 Subestação coletora/elevadora

A Subestação Coletora é do tipo convencional, não abrigada e construída de acordo com as normas da ABNT, com setores de 230 kV, setor de transformação composto de 2 transformadores elevadores trifásicos de 230/34,5/34,5kV e 36 alimentadores de 34,5 kV.

## 2.8 Linha de transmissão e conexão com a rede básica

A conexão do complexo fotovoltaico é feita na SE Jaíba em 230 kV, através de linha de transmissão de uso exclusivo de aproximadamente 15 km de extensão. A LT é composta por circuito duplo, condutor CAL-1120, 2 condutores por fase, e realiza a interligação da SE Coletora do Complexo Fotovoltaico à Subestação da Rede Básica.

## 3 Teste de desempenho

### 3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, serão apresentados o procedimento e a metodologia para a aplicação de Teste de Desempenho, os principais critérios para execução do teste de performance, a documentação inicial, relatório de comissionamento, organograma, bem como as principais rotinas do BOS e O&M a serem executadas durante o período de testes.

### 3.2 Procedimento e metodologia

Por conceito, definiu-se que o teste de performance deve ter duração de 30 dias e as partes (contratante e BOS) devem ser notificadas com antecedência mínima de sete dias sobre o início da coleta de dados para o Teste de Desempenho. O teste deve ser aplicado individualmente às UFVs do Complexo e os resultados destes testes não podem ser extrapolados para fins de aprovação de outras usinas além daquela que teve seu desempenho testado.

Os pré-requisitos para aptidão a início do teste de uma UFV são:

- Comissionamento finalizado;
- Avaliação da documentação;
- UFV 100% operacional;
- Limpeza dos módulos fotovoltaicos.

O grau de limpeza e de operacionalidade da planta não podem ser imputadas como variável de ajuste de resultados. Somente nos casos de interferência externa, ao qual os envolvidos não possuem controle (ex.: restrição da geração por parte do ONS) serão desconsiderados os dados medidos durante o período de realização dos testes, não sendo escopo do trabalho identificar as causas raízes de eventuais problemas que venham a ser percebidos durante a realização dos Testes de Desempenho.

### 3.3 Métrica

Os dados medidos são os dados coletados para a simulação computacional da usina em teste ou para a comparação dos resultados simulados (energia medida) sendo fornecidos para cada dia de teste.

A localização geográfica da usina define a quantidade máxima de número de Horas de Teste ( $n \times 60\text{-min}$ ) possível de ser alocado entre o nascer e o pôr do sol, sendo esse o "Dia de Teste" com início e término a cada hora cheia ou a frações de quarto de hora (15-min).

Para ocorrência de irradiância maior que  $600 \text{ W/m}^2$  por 4 (ou mais) Horas de Teste consecutivas serão considerados dias perfeitos. Já o dia válido é um Dia de Teste com ocorrência de irradiância maior que  $600 \text{ W/m}^2$  por 1 ou mais Horas de Teste, consecutivas ou não.

A energia medida deve ser considerada como a energia ativa produzida e exportada pela usina, descontado o consumo próprio, medida no ponto de medição para faturamento da usina, integrada para intervalos de 1 hora, expressa em kWh ou MWh.

Já a energia esperada é o valor de energia ativa resultante da simulação computacional da usina modelada, considerando seu design *as built* e variáveis ambientais medidas durante o período de teste, expressa em kWh ou MWh.

A mensuração do desempenho é realizada pelo EPI (*Energy Performance Index*), sendo a métrica que compara o desempenho energético da usina real com a produção energética esperada a partir do modelamento computacional do projeto.

$$EPI = \frac{E_{medida}}{E_{esperado}}$$

### 3.4 Responsabilidade e definições

Todos os dados devem estar vinculados a uma mesma referência temporal, ou seja, seus rótulos de tempo devem ser idealmente fornecidos por um servidor de tempo único para todo o Complexo e possuir a mesma notação de periodicidade (horário indicado ou o início ou o final do Intervalo de Amostragem).

Os dados devem ser disponibilizados pelo administrador da base de dados da usina em teste, em formato .CSV, idealmente em um arquivo por usina, por dia, com as colunas devidamente identificadas na primeira linha.

Devem ser coletados, para fins de simulação computacional e comparação dos resultados, os seguintes dados da usina em teste:

- Irradiação global no plano horizontal (GHI);
- Irradiação global no plano inclinado (GTI);
- Albedo;
- Temperatura ambiente;

- Energia no ponto de medição individual - PMI;
- Potência aparente no PMI;
- Potência reativa no PMI;
- Potência ativa no PMI.

Devem ser processados os dados solarimétricos da usina em teste e os dados habilitados e disponíveis das usinas imediatamente vizinhas no Complexo. Os dados coletados das estações solarimétricas devem ser filtrados quanto à sua plausibilidade, ponderados por sua média aritmética para cada Intervalo de Amostragem para, por fim, serem integralizados para os intervalos de 60-min. Na eventualidade da falha de um ou mais sensores e/ou estações solarimétricas, estes dados serão descartados e serão considerados os dados dos demais sensores habilitados e disponíveis. Devem ser compartilhados diariamente os registros de atividades de operação e manutenção relativos à usina em teste.

São considerados dados acessórios ao teste aqueles eventualmente coletados durante o período do Teste de Desempenho com fins a auxiliar as equipes de operação e manutenção na identificação de eventuais problemas que se manifestem durante a realização dos testes de Desempenho. Os dados acessórios não são aplicados na simulação computacional para determinação da Energia Esperada. São considerados dados acessórios, mas não limitados a estes:

- Temperatura da superfície dos módulos;
- Temperatura interna dos inversores;
- Velocidade do vento;
- Sujidade dos módulos FV;
- Precipitação;
- Energia ativa nos inversores;
- Energia ativa nos transformadores unitários;
- Limitação de potência nos inversores (PPC);
- Disponibilidade da linha de transmissão e a capacidade de exportação de energia pelo Complexo no PMI.

A orientação angular dos rastreadores solares não será monitorada, sendo assumida sempre como correta a partir dos relatórios de comissionamento da usina. Os dados acessórios devem ser sumarizados, sem tratamento, e apresentados em conjunto com os dados do Teste de Desempenho nos relatórios do Teste.

### 3.5 Limpeza dos sensores de irradiação

Durante o período do Teste de Desempenho, todos os sensores de irradiação devem ser mantidos limpos. A limpeza dos sensores deve ser realizada, preferencialmente após o pôr do sol, de forma a evitar o sombreamento dos sensores durante as horas de teste. A rotina de limpeza deve ser iniciada no dia anterior ao primeiro Dia de Teste, ou antes. Um relatório deve ser produzido, em que conste a hora da visita ao sensor, se houve necessidade de intervenção de limpeza e a assinatura do responsável para cada Dia de Teste. Este relatório será anexado ao Relatório Final do Teste de Desempenho da usina.

### 3.6 Tratamento dos dados

Seguindo-se as recomendações da IEC 61724, as medidas devem ser filtradas no que se refere à sua plausibilidade (se pode ser interpretado como natural), à eventual falta de registro e à sua taxa de variação temporal.

As medidas de irradiação não conformes devem ser excluídas da série. As medidas restantes do período em questão devem ser ponderadas pela média aritmética das medidas restantes no intervalo. Por fim, a série será novamente ponderada para um período de 60-min pela média aritmética dos valores disponíveis na série para o respectivo período.

Nos intervalos próximos ao nascer e pôr do sol, se alguma das medidas de irradiação global no plano horizontal for inferior a  $0 \text{ W/m}^2$ , todas as demais medidas do intervalo devem ser descartadas.

As medidas de temperatura não-conformes devem ser excluídas da série e interpoladas quando as exclusões se referirem a intervalos contínuos inferiores a 15-min. As medidas restantes do período em questão devem ser ponderadas pela sua média aritmética. Por fim, a série será novamente ponderada para um período de 60-min pela média aritmética dos valores disponíveis na série para o respectivo período.

### 3.7 Tabela de horários de execução do teste

Considera-se, para fins de simulação computacional e obtenção do valor da Energia Esperada, apenas os dados coletados nas Horas de Teste indicadas na Tabela de Horários de Execução do Teste.

O Agente Independente indicará a fórmula de cálculo ou a fonte de dados astronômicos para estabelecer os horários de nascer e pôr do sol. Sugere-se a fonte “*SunEarthTools*”, disponível abertamente na internet.

A partir dos horários de nascer e pôr do sol deriva-se uma nova tabela de horários de início e fim de cada Dia de Teste, iniciando preferencialmente a partir de cada hora

cheia ou fração de quarto de hora, de forma a se obter o máximo número de horas inteiras ( $n \times 60\text{-min}$ ) alocáveis entre o nascer e o pôr do Sol em um determinado dia.

A quantidade total de horas inteiras analisadas durante o Teste será a base para o cálculo das Disponibilidades de Potência e de Dados, excetuadas aquelas horas excluídas justificadamente, conforme descrito no item 3.16.

### 3.8 Tabela de horários de execução do teste

Serão coletados dados para o Teste de Desempenho até que uma das condições a seguir seja atendida, quando então a coleta de dados será encerrada:

- 20 Dias Perfeitos consecutivos observados, dentro de uma janela de até 30 dias.
- Se a condição anterior não for atingida ou não for mais possível, 15 Dias Perfeitos observados, consecutivos ou não, dentro de uma janela de até 30 dias.
- Se a condição anterior não for atingida, 30 dias de coleta de dados.

### 3.9 Pré-teste

O Pré-Teste é o ensaio geral da realização do Teste de Desempenho, durante o qual serão coletados os dados para uma análise preliminar da usina quanto à sua capacidade de atender satisfatoriamente às expectativas de geração de energia.

Os resultados do Pré-Teste não são garantia de aprovação do Teste de Desempenho subsequente e durante o Pré-Teste serão avaliados os processos de coleta e de disponibilização dos dados e é preparada uma simulação inicial da Energia Esperada.

Os resultados do Pré-Teste devem ser divulgados às partes, que poderão se manifestar com sugestões de melhoria a serem ou não absorvidas para o modelamento final.

O BOS e o O&M podem realizar manutenções, obras e atividades que julgar necessárias durante a realização do Pré-Teste, ainda que a interferência na usina durante esse período se reflita em incertezas nos resultados que venham a ser obtidos, restando apenas a responsabilidade em informar as partes sobre eventuais intervenções realizadas, de modo a facilitar as atividades de análise do Agente Independente.

A usina não precisa estar com a superfície dos módulos limpos para a realização do Pré-Teste sendo previsto a realização de um Pré-Teste para cada usina do Complexo.

## 3.10 Modelo Computacional

O modelamento computacional da usina em teste tem por objetivo realizar os cálculos lineares e não-lineares necessários para a determinação do valor da Energia Esperada, a ser igualada ou superada pelos dados de geração registrados no ponto de medição individual da usina.

O software utilizado é o PVsyst, na sua versão mais atual disponível. Deverá ser fornecido à certificadora o arquivo “.PRJ” do PVsyst considerado para a certificação de energia da usina a ser testada, contendo a integralidade dos dados e configurações necessárias para a obtenção dos resultados indicados na certificação.

A certificadora validará e realizará todas as modificações identificadas no projeto *as built*, de forma a refletir no modelamento computacional a realidade da usina construída. Devem ser assumidas as perdas ôhmicas conforme memória de cálculo do projeto executivo e eventuais alterações identificadas nos documentos *as built*.

O modelamento considerará que a superfície dos módulos fotovoltaicos da usina em teste encontra-se limpa durante o período de realização do Teste de Desempenho, com eventuais acúmulos pontuais, não homogêneos, ao longo da usina em teste. Assim, a perda por sujeidade considerada para efeitos do modelamento computacional será fixa e igual a 0,5%.

Para fins da simulação computacional, assume-se que todos os rastreadores solares (*trackers*) da usina em teste estão operando dentro das condições nominais esperadas. Ou seja, não serão realizados ajustes nos resultados obtidos para a Energia Esperada referente à operação dos rastreadores solares e eventuais falhas serão consideradas característica de desempenho intrínseca da usina.

O modelamento da usina será submetido à aprovação das partes previamente à realização da efetiva coleta dos dados para o Teste de Desempenho, não sendo passível de revisões após sua aprovação.

Finalizado o período de coleta de dados, estes devem ser inseridos como dados de entrada da simulação computacional para obtenção do valor da Energia Esperada e sua incerteza associada.

Os dados de entrada devem ser integralizados para intervalos horários, compatibilizando-os como entrada para a simulação computacional para a determinação da energia esperada. O resultado desejado da simulação computacional é a Energia Esperada no Ponto de Medição Individual da usina e as respectivas incertezas associadas.

### 3.11 Requisitos para início do teste de desempenho

A certificadora deve ser notificada sobre a liberação da usina para a aplicação do Teste de Desempenho com, pelo menos, 7 dias de antecedência. Para início dos testes as seguintes condições devem ser verificadas:

- A usina deverá estar comissionada, ou seja, todos os respectivos inversores deverão estar em operação e a usina deverá possuir conexão ao sistema de transmissão que permita a entrega da energia gerada.
- Totalidade dos módulos limpos na data de início do Teste de Desempenho.
- Área de reflexão do solo limpa e sem presença de vegetação.
- Totalidade dos piranômetros limpos.

### 3.12 Manutenções e intervenções

Fica a critério do BOS e O&M a aplicação de manutenções preditivas, preventivas ou corretivas durante o período de realização do Teste de Desempenho. No entanto, em função destas ações não poderão ser reclamados ajustes aos dados coletados ou resultados obtidos durante o teste e serão consideradas características de desempenho intrínseca da usina.

Os efeitos da intervenção não poderão ser considerados como critério de ajuste dos dados coletados previamente à intervenção. Os sensores e medidores a serem considerados para o teste deverão estar operando plenamente e devidamente identificados quanto ao seu local de instalação, números de série e, se aplicável, estado de calibração, com o registro completo e inequívoco de suas características físicas e condições de instalação, com especial atenção à orientação (em relação ao plano horizontal e ao norte geográfico), distanciamento de influências locais, bem como suas condições atuais de operabilidade, confiabilidade e limpeza.

### 3.13 Certificados

Certificados de calibração da estação solarimétrica e do multimedidor quando aplicável devem ser coletados previamente ao início do teste e anexados ao Relatório Final do Teste. Deverá ser verificada previamente a necessidade de aplicação de fator de transformação para a correção dos dados brutos obtidos a partir dos instrumentos de medição, assim como relatar como e onde estas transformações estão sendo aplicadas aos dados a serem considerados para o teste.

Deverá ser assegurado o completo alinhamento temporal dos dados, especialmente se coletados e armazenados por diferentes sistemas e equipamentos, independentes entre si.

### 3.14 Sistema SCADA

O sistema supervisório da usina deve estar integralmente comissionado, operando nas condições nominais esperadas, apto a coletar os dados requisitados para o teste sem falhas ou interrupções, assim como exportar estes dados no formato esperado para o compartilhamento com a certificadora. Os dados devem possuir a mesma base de tempo, estando sincronizado de preferência por GPS (*Global Positioning System*).

### 3.15 Disponibilização dos dados

Diariamente devem ser exportados os dados do dia anterior de geração dos multi-medidores principal e retaguarda da UFV e os dados das estações solarimétricas, da UFV em teste e das UFVs vizinhas. Os arquivos e os RDOs devem ser salvos em um pasta online compartilhada até as 11h30 de forma que a certificadora tenha acesso as informações no período da tarde.

### 3.16 Exclusão de dados

Dados poderão ser excluídos da análise apenas em função da ocorrência de indisponibilidade forçada da rede de transmissão, indisponibilidade programada demandada pelo ONS ou algum outro evento de força maior e que, portanto, impeçam a exportação da energia produzida na usina por motivo além da capacidade de resolução pelas equipes de operação e manutenção da usina.

A exclusão dos dados deverá ser solicitada pela contratada, justificada com os registros que indiquem o desligamento de equipamento(s), do estado do ponto de conexão, os momentos de início e fim da ocorrência e, se houver, comunicação recebida do ONS sobre o evento. Essas informações devem ser disponibilizadas junto aos demais dados do item [3.15](#)

### 3.17 Relatório de conclusão

O relatório de conclusão será composto do sumário dos relatórios diários, relatório da simulação PVsyst e os anexos composto do checklist de autorização para início dos

testes, relatório de limpeza dos sensores de irradiação, relatórios de instalação dos sensores monitorados e tabela de horários de realização do teste.

### 3.17.1 Aprovação do teste de performance

Deve ser calculado o EPI considerando-se os valores medidos e calculados e suas respectivas incertezas:

$$EPI = \frac{E_{medida+Incerteza}}{E_{esperado+Incerteza}}$$

Não admite-se ajustes para o cálculo do EPI, em especial aqueles atribuídos a transitórios, fenômenos infra horários ou devidos à oscilação da eficiência de equipamentos ativos ou passivos em função de sua temperatura. O Teste de Desempenho tem seu resultado aprovado, caso o EPI obtido seja igual ou superior a 1.

### 3.17.2 Reprovação do teste de performance

Em caso de reprovação do Teste de Desempenho, além da execução das condições previstas em contrato, caso se entenda pela aplicação de novas rodadas do Teste de Desempenho, estas serão realizadas às expensas da contratada, sob as mesmas condições determinadas no procedimento, sem prejuízo de novas condições que venham a ser impostas pela contratante.

## 4 Resultados

### 4.1 Considerações iniciais

Os resultados apresentados a seguir correspondem a uma UFV composta de 8 unidades geradoras, totalizando 39,4 MW. A Tabela 4.1 apresenta de forma sequencial: os dias de coleta dos dados; temperatura média dos módulos fotovoltaicos (°C); GHI - irradiância global no plano horizontal (Wh/m<sup>2</sup>.dia); POA - irradiância no plano dos módulos (Wh/m<sup>2</sup>.dia); dias válidos; dias perfeitos; energia esperada (kWh) e energia Medida (kWh).

Tabela 4.1 – Sumário do teste de desempenho.

Dia	°C	GHI Wh/m <sup>2</sup>	POA Wh/m <sup>2</sup>	Válido	Perfeito	E. Esp. (kWh)	E. Med. (kWh)
1	48,8	6.426	8.962	SIM	SIM	317.180	311.954
2	44,9	5.572	7.456	SIM	SIM	261.326	259.409
3	46,4	6.712	8.870	SIM	SIM	323.657	327.652
4	47,6	6.653	8.964	SIM	SIM	312.831	306.363
5	49,5	6.772	9.215	SIM	SIM	331.040	333.458
6	50,1	6.870	9.459	SIM	SIM	340.525	320.223
7	48,5	5.811	8.588	SIM	SIM	275.186	277.213
8	38,2	4.313	5.791	SIM	NÃO	199.757	196.941
9	34,2	3.748	4.145	SIM	NÃO	162.307	160.738
10	39,4	4.667	5.406	SIM	SIM	197.495	189.172
11	34,6	4.326	4.777	SIM	SIM	180.721	176.607
12	43,2	5.473	8.336	SIM	SIM	273.886	264.999
13	42,3	5.573	7.631	SIM	SIM	261.538	248.725
14	46,1	5.281	8.112	SIM	NÃO	259.102	263.922
15	48,2	6.230	8.357	SIM	SIM	304.906	304.651
16	47,3	5.567	7.661	SIM	SIM	258.983	268.918
17	46,2	5.938	7.862	SIM	SIM	278.646	266.515
18	42,5	4.775	6.346	SIM	NÃO	210.613	206.292
19	47,5	6.086	8.383	SIM	SIM	300.841	294.396
20	42,1	5.296	6.792	SIM	SIM	242.804	242.274
21	48,2	5.425	8.210	SIM	NÃO	283.859	272.652
22	32,8	2.941	3.607	NÃO	NÃO	130.054	124.792
23	37,7	5.355	7.136	SIM	SIM	258.369	253.781
24	40,9	5.436	7.588	SIM	SIM	263.543	272.113
25	45	6.122	8.347	SIM	SIM	309.225	313.192
26	46,8	5.886	8.304	SIM	SIM	291.899	295.467
27	48,1	5.640	7.705	SIM	SIM	274.168	281.470
28	45,3	5.236	7.502	SIM	SIM	248.519	256.710
29	33,3	2.795	3.918	NÃO	NÃO	134.596	135.595
30	43,5	4.611	6.344	SIM	NÃO	220.075	219.646

Fonte: adaptado de (LUBKE, 2023)

### 4.1.1 Irradiância global no plano horizontal

A Figura 4.1 apresenta o boxplot da irradiância no plano horizontal, para o período, observa-se o valor mínimo de 2.795 Wh/m<sup>2</sup>.dia, o valor máximo de 6.870 Wh/m<sup>2</sup>.dia e a mediana igual a 5.520 Wh/m<sup>2</sup>.dia. Das amostras, 25% são superiores a 6.095 Wh/m<sup>2</sup>, 50% superam 5.520 Wh/m<sup>2</sup>.dia e 75% estão acima de 4.748 Wh/m<sup>2</sup>.dia.

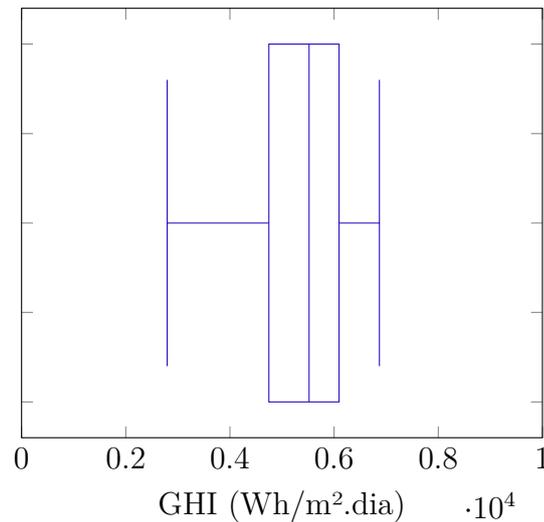


Figura 4.1 – Boxplot da irradiância global no plano horizontal.

### 4.1.2 Irradiância no plano dos módulos

Já a Figura 4.2 apresenta o boxplot da irradiância no plano inclinado para o mesmo período. Observa-se o valor mínimo de 3.607 Wh/m<sup>2</sup>.dia, o valor máximo de 9.459 Wh/m<sup>2</sup>.dia e a mediana igual a 7.683 Wh/m<sup>2</sup>.dia. Sendo 25% das amostras superiores a 8.364 Wh/m<sup>2</sup>.dia, 50% superam 7.683 Wh/m<sup>2</sup>.dia e 75% estão acima de 6.346 Wh/m<sup>2</sup>.dia.

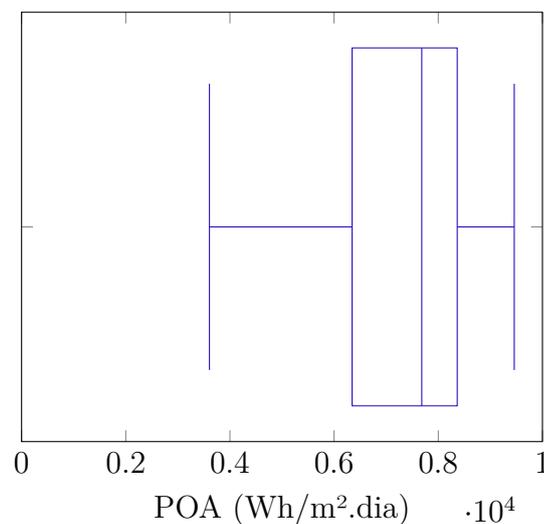


Figura 4.2 – Boxplot da irradiância no plano inclinado.

### 4.1.3 Temperatura dos módulos

No período de avaliação, observa-se o valor mínimo de 32,8 °C, o valor máximo de 50,1 °C e a mediana igual 45,15 °C. 25% das amostras são superiores a 47,72 °C, 50% superam 45,15 °C e 75% estão acima de 42,52 °C conforme Figura 4.3.

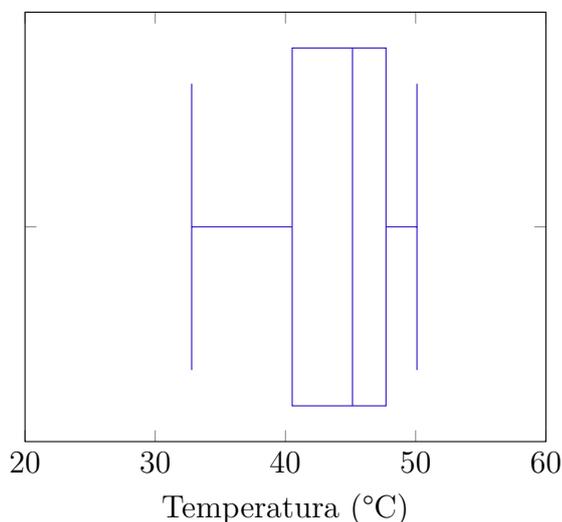


Figura 4.3 – Boxplot da temperatura dos módulos.

## 4.2 Avaliação

### 4.2.1 Dia de teste - 3

O dia de teste 3 é considerado um dia bom, pois a energia gerada conforme a Tabela 4.1 foi de 327.652 kWh, superando a energia esperada de 323.657 kWh. A temperatura ambiente registrada foi de 30 °C, a temperatura dos módulos de 46,4 °C medida *versus* uma temperatura esperada de 48 °C. A irradiância POA medida foi de 8.870 Wh/m<sup>2</sup>.dia, superando a irradiância esperada de 8.492 Wh/m<sup>2</sup>.dia.

Na Figura 4.4 são apresentados os *deficits* de geração de energia em relação à energia esperada pelo modelo da UFV, sendo -2242 kWh às 7 h, -1203 kWh às 15 h e -2374 kWh às 17 h. A perda de geração no início e fim do dia pode representar sombreamento nos módulos causado, geralmente, por diferença na cota de montagem dos *trackers*. Ao avaliar o RDO é possível identificar que o *deficit* apresentado entre 7h00 e 7h59 é referente à condição de falha no inversor solar, demandando rearme em campo. No mesmo RDO é possível identificar o motivo dos dois *deficits* no período da tarde, sendo que, para o primeiro evento entre 15h00 e 15h59, a causa foi a falha no sistema de refrigeração do inversor e o segundo período, de 17h00 às 17h59, a mesma causa, porém com necessidade de rearme em campo.

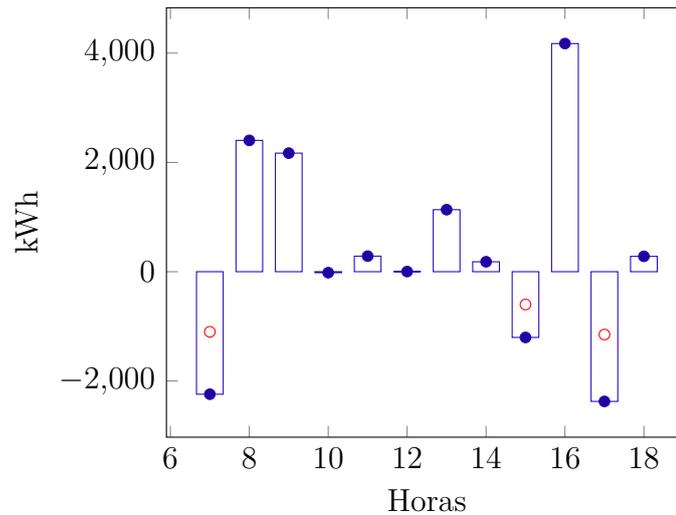


Figura 4.4 – Desempenho Dia 3 (Energia medida - Esperada).

A Tabela 4.2 apresenta de forma sequencial: Horário, em intervalos de 60 min; Temperatura do módulos fotovoltaicos ( $^{\circ}\text{C}$ ); GHI - Irradiância global no plano horizontal ( $\text{Wh}/\text{m}^2.\text{dia}$ ) média; Energia esperada (kWh) e Energia Medida (kWh).

Tabela 4.2 – Sumário Dia 3.

Horário	Temperatura dos módulos	GHI $\text{Wh}/\text{m}^2.\text{dia}$ médio	Energia Esperada (kWh)	Energia Medida (kWh)
7	20	82	6.344	4102
8	40	275	23.158	25.561
9	51	516	32.708	34.878
10	48	742	36.368	36.350
11	50	885	37.137	37.422
12	52	957	37.109	37.112
13	53	953	36.000	37.135
14	56	878	36.265	36.447
15	57	748	35.670	34.467
16	49	350	17.336	21.511
17	49	282	22.885	20.511
18	32	44	1.877	2.158

Fonte: Autor

#### 4.2.2 Dia de teste - 10

O dia de teste 10 é considerado um dia ruim, pois a energia gerada conforme a Tabela 4.1 foi de 189.172 kWh, não atingindo a energia esperada de 197.495 kWh. A temperatura ambiente registrada foi de  $28^{\circ}\text{C}$ , a temperatura dos módulos de  $39^{\circ}\text{C}$  medida, sendo esse o valor da temperatura esperado para o dia. A irradiância POA registrada foi de  $5.406 \text{ Wh}/\text{m}^2.\text{dia}$ , superando a irradiância esperada de  $4.969 \text{ Wh}/\text{m}^2.\text{dia}$ .

Na Figura 4.5 são apresentados os *deficit* de geração de energia em relação à energia esperada pelo modelo da UFV, sendo -5256 kWh ao longo do dia. Os dois primeiros eventos, de 7h00 às 7h59 e de 8h00 às 8h59, novamente são indícios de sombreamento nos módulos causado, geralmente, por pequenas diferença na cota de montagem dos *trackers*. Os *deficit* ocorridos de 10h00 às 10h59, 11h00 às 11h59 e de 12h00 às 12h59 são consequência de um desarme do disjuntor de comando responsável por alimentar o circuito eletrônico do sistema de rastreamento solar, logo os módulos permanecerão na posição de segurança (sentido Oeste). Após a substituição do disjuntor, a UFV volta a gerar e supera a expectativa do modelo em 1.084 kWh na janela de 13h00 às 13h59. Porém um novo evento na rede de comunicação impacta novamente o resultado em -2.334 kWh e -601 kWh nas janelas de 14h às 14h59 e 15h00 às 15h59 respectivamente.

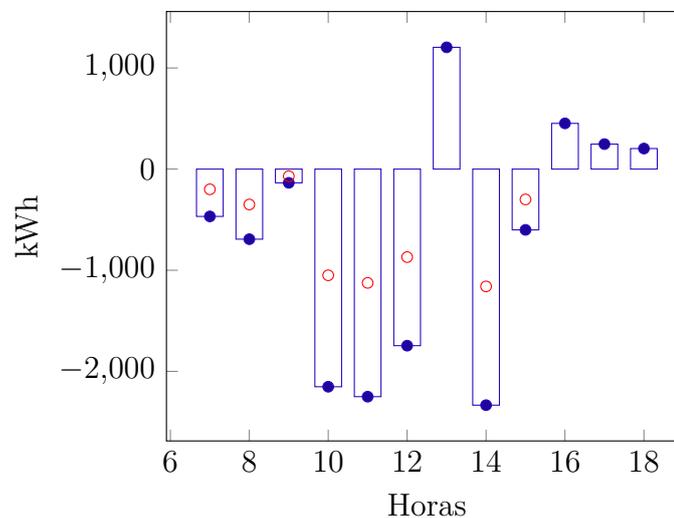


Figura 4.5 – Desempenho Dia 10 (Energia medida - Esperada).

A Tabela 4.3 apresenta de forma sequencial: Horário, em intervalos de 60 min; Temperatura do módulos fotovoltaicos ( $^{\circ}\text{C}$ ); GHI - Irradiância global no plano horizontal ( $\text{Wh}/\text{m}^2.\text{dia}$ ) média; Energia esperada (kWh) e Energia Medida (kWh).

Tabela 4.3 – Sumário Dia 10.

Horário	Temperatura dos módulos	GHI Wh/m <sup>2</sup> .dia médio	Energia Esperada (kWh)	Energia Medida (kWh)
7	22	33	1159	691
8	30	118	4.794	4.101
9	35	279	12.634	12.498
10	45	506	23.949	21.797
11	48	628	26.983	24.733
12	52	805	32.126	30.380
13	50	714	28.784	29.988
14	52	769	32.794	30.460
15	46	476	21.498	20.897
16	31	176	6.262	6.714
17	34	133	5.657	5.904
18	29	30	897	1.100

Fonte: Autor

### 4.2.3 Dia de teste - 15

O dia de teste 15 é considerado um dia de atenção, pois a energia gerada conforme a Tabela 4.1 foi de 304.651 kWh, levemente abaixo da energia esperada de 304.906 kWh. A temperatura ambiente registrada foi de 31 °C e a temperatura dos módulos medida e esperada foi de 48 °C. A irradiância POA medida foi de 8.357 Wh/m<sup>2</sup>.dia, superando a irradiância esperada de 7.967 Wh/m<sup>2</sup>.dia.

A Figura 4.6 apresenta *deficit* de geração de energia em relação à energia esperada pelo modelo da UFV no início e final do dia, sendo esse um comportamento característico da UFV já explicado anteriormente. Destaca-se a baixa performance na janela entre 12h00 e 12h59, sendo essa uma característica típica de limitação de potência por parte do inversor solar de forma a reduzir a temperatura interna do equipamento.

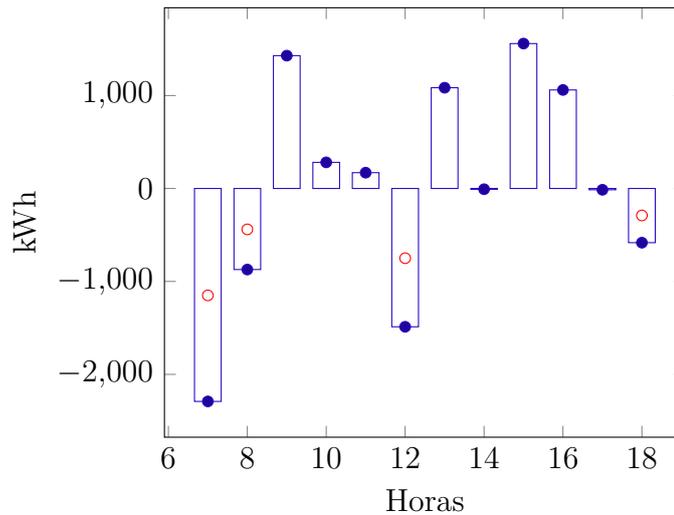


Figura 4.6 – Desempenho Dia 15 (Energia medida - Esperada).

A Tabela 4.4 apresenta de forma sequencial: Horário, em intervalos de 60 min; Temperatura dos módulos fotovoltaicos ( $^{\circ}\text{C}$ ); GHI - Irradiância global no plano horizontal ( $\text{Wh}/\text{m}^2.\text{dia}$ ) média; Energia esperada (kWh) e Energia Medida (kWh).

Tabela 4.4 – Sumário Dia 15.

Horário	Temperatura dos módulos	GHI $\text{Wh}/\text{m}^2.\text{dia}$ médio	Energia Esperada (kWh)	Energia Medida (kWh)
7	23	67	4.437	2.146
8	35	199	12.886	12.014
9	52	452	27.613	29.042
10	54	690	34.164	34.445
11	53	825	34.868	35.038
12	52	898	35.121	33.633
13	54	836	32.988	34.072
14	56	830	34.928	34.920
15	58	653	32.644	34.203
16	57	474	30.804	31.864
17	50	248	20.202	20.188
18	33	58	3.670	3.087

Fonte: Autor

### 4.3 Dia de teste - Excluído

Durante a execução do teste de performance, seis dias foram excluídos seguindo os critérios estabelecidos conforme o item 3.16. Os quatro primeiros dias foram expurgados devido à falha no PPC (*Power Plant Controller*) que, em diversos momentos de operação da planta, realizou alterações indevidas no *setpoint* de potência do inversor, prejudicando a operação da UFV e, por consequência, a produção de energia. Os outros dois dias foram

descartados devido à baixa produção de energia decorrente de restrições impostas pelo ONS (Operador Nacional do Sistema) visando garantir a estabilidade do SIN.

O PPC é o sistema responsável por controlar a geração de energia da planta, buscando sempre trabalhar no ponto ótimo de operação dos equipamento de forma a gerar o máximo de energia sem ultrapassar o MUST (Montantes de Uso no Sistema de Transmissão). A Figura 4.7 ilustra os diversos momentos em que o PPC altera o *setpoint* de potência para valores inferiores a 100%.

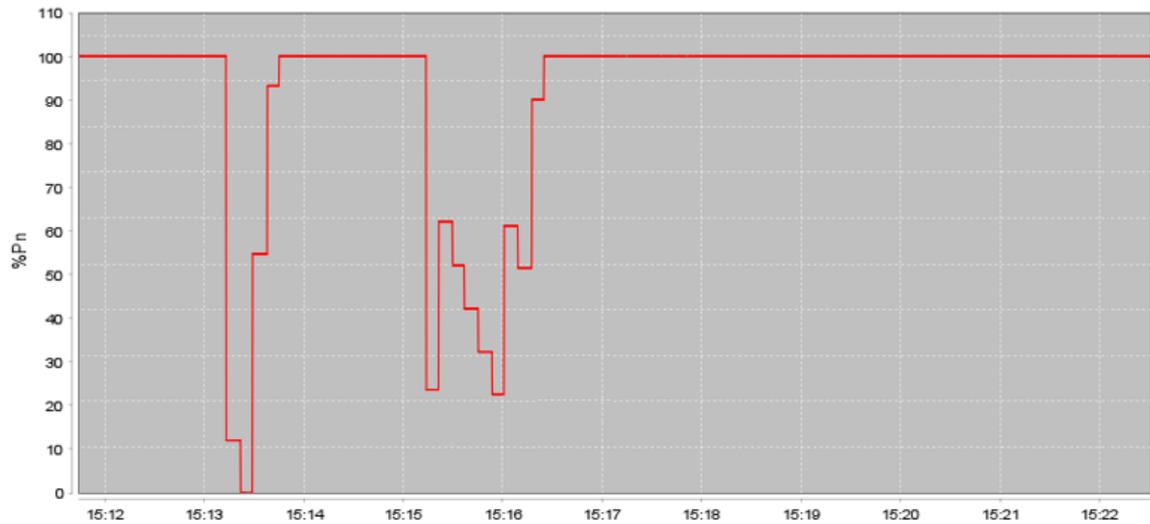


Figura 4.7 – *Setpoint* de potência.

No dia 22/04 foi observado pela equipe de comissionamento que o *setpoint* do inversor estava oscilando em campo. Para verificar se esse comportamento era devido ao controle do PPC, solicitou-se ao operador da sala de controle que o sistema fosse desativado como mostra o instante T2 da Tabela 4.5. Nesse momento, mesmo desativado pela interface de operação, há redução do *setpoint* para 12,5%. Em T4 o operador ativa novamente o sistema, porém o PPC não retorna de imediato ao *setpoint* de 100%, oscilando o valor até o instante T16, quando o equipamento retorna a sua operação normal.

Tabela 4.5 – Alteração de *setpoint*.

	Setpoint Pedido	Potência (%)	Horário	Descrição
T1	100%	100%	15:13:00	Operação normal
T2	100%	12,5%	15:13:10	Operador desativa o PPC
T3	100%	0%	15:13:20	PPC desativado
T4	100%	55%	15:13:30	Operador ativa o PPC
T5	100%	95%	15:13:40	PPC Ativado
T6	100%	100%	15:13:45	Operação normal
T7	100%	24%	15:15:15	Operação anormal
T8	100%	62,5%	15:15:20	Operação anormal
T9	100%	52,5%	15:15:30	Operação anormal
T10	100%	43,5%	15:15:35	Operação anormal
T11	100%	32,5%	15:15:45	Operação anormal
T12	100%	22,5%	15:15:55	Operação anormal
T13	100%	60%	15:16:00	Operação anormal
T14	100%	50%	15:16:10	Operação anormal
T15	100%	90%	15:16:20	Operação anormal
T16	100%	100%	15:16:30	Operação normal

Fonte: Autor

Após esse evento, foi solicitando ao fabricante do sistema a desativação da aplicação até que o problema fosse solucionado. Com o PPC desativado, todos os inversores da UFV em teste foram "setados" em 100% e permaneceram operando com *setpoint* máximo até o final do teste.

Em condições normais de operação, o complexo solar atinge 400 MW de potência instantânea por volta das 8h da manhã. No dia 23/04, o COS (Centro de Operação do Sistema) remoto foi solicitado pelo ONS para limitar a potência ativa do complexo conforme Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Restrição sistêmica

	Pedido	Potência (MW)	Horário	Motivo
T1	Limitar a potência ativa	131	7:02	Controle de frequência no SIN
T2	Limitar a potência ativa	118	7:33	Controle de frequência no SIN
T3	Limitar a potência ativa	142	10:47	Controle de frequência no SIN
T4	Limitar a potência ativa	166	11:58	Controle de frequência no SIN
T5	Limitar a potência ativa	190	12:09	Controle de frequência no SIN
T6	Limitar a potência ativa	226	12:36	Controle de frequência no SIN
T7	Limitar a potência ativa	298	13:15	Controle de frequência no SIN
T8	Limitar a potência ativa	333	13:29	Controle de frequência no SIN
T9	Limitar a potência ativa	367	13:35	Controle de frequência no SIN
T10	Limitar a potência ativa	400	14:13	Controle de frequência no SIN
T11	Fim da restrição	-	14:36	

Fonte: Autor

Os eventos de restrição solicitados pelo ONS visam garantir a estabilidade do sistema elétrico por meio do controle de frequência. A partir dessa data, observou-se uma necessidade frequente de restrições aos finais de semana, sendo predominante aos Domingos, data de menor carga nos terminais de conexão e maior excedente de geração de energia.

#### 4.4 Resultado do teste de desempenho

O desempenho diário durante os 30 dias de avaliação é apresentado na Figura 4.8 considerando as incertezas do modelo (2,7%) e do medidor de energia (0,1%). Para que a usina seja aprovada, o somatório das barras na parte superior deve ser maior ou igual ao somatório das barras inferiores do gráfico.

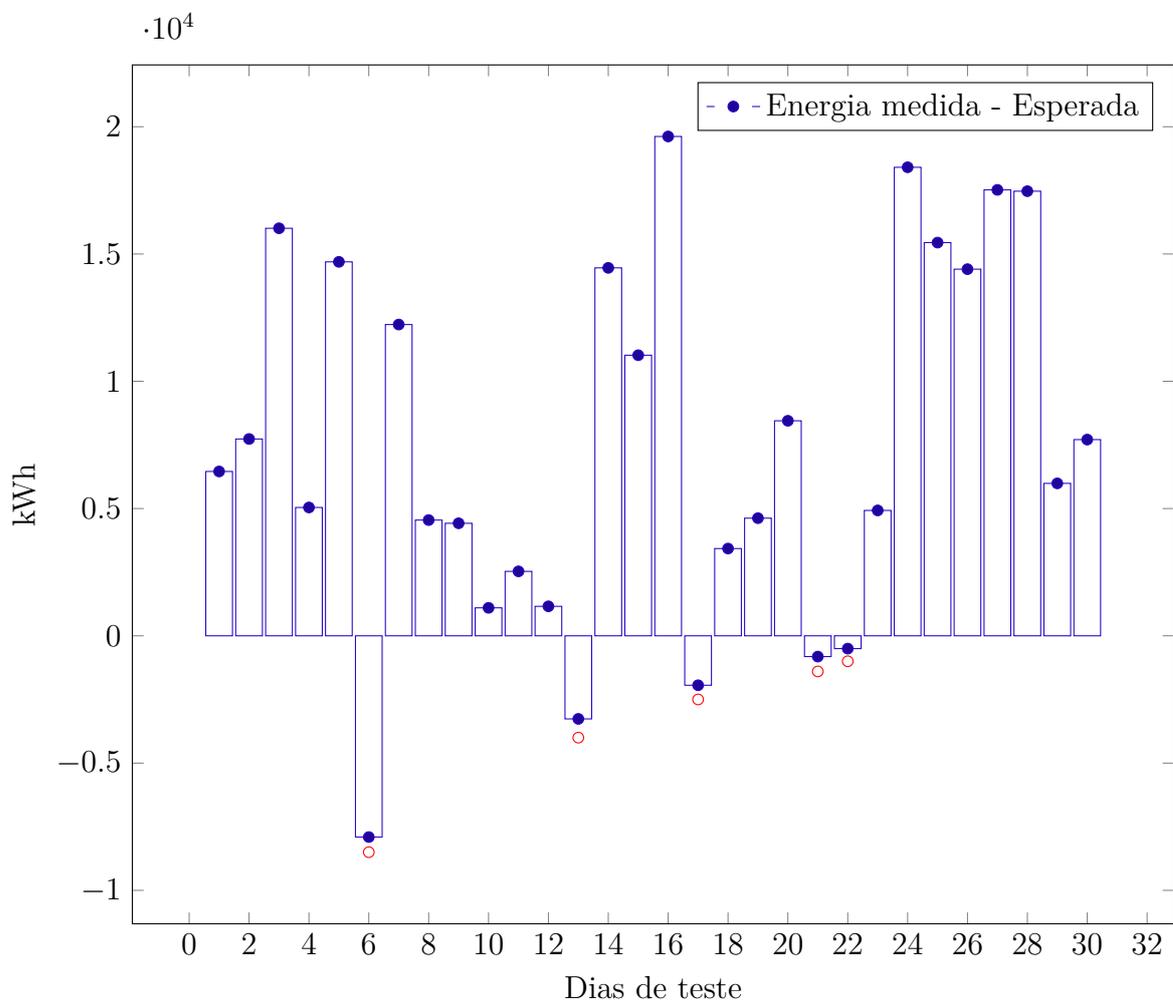


Figura 4.8 – Desempenho no período.

#### 4.4.1 Histograma de energia

No histograma da Figura 4.9, observa-se 10 dias de geração de energia com valores de 244 kWh a 273 kWh seguidos de 7 dias de geração com valores de 303 kWh a 333 kWh, ambos à direita do gráfico. Em condições normais de operação a energia é, de forma simplificada, uma função de correlação direta com a irradiância acumulada naquela dia. É possível notar, na Tabela 4.1, que a geração supera os 300 kWh somente quando o GHI é superior à 6.000 Wh/m<sup>2</sup>.dia.

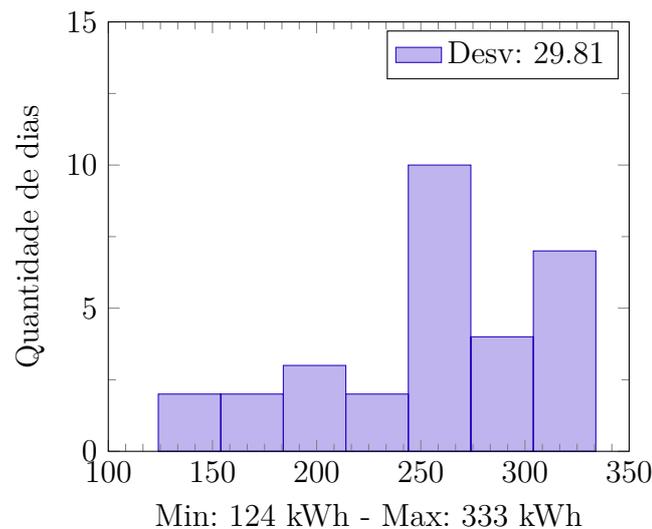


Figura 4.9 – Histograma de Energia Gerada em kWh.

#### 4.4.2 Energia medida versus Irradiância

Por fim, a Figura 4.10 apresenta, no eixo y, a energia gerada em kWh e, no eixo x, a irradiância em Wh/m<sup>2</sup>.dia. Observa-se que a energia gerada em condições normais pode ser aproximada, especificamente para este caso, a uma função de primeiro grau ( $y=47.53*x$ ). Sendo assim, é possível afirmar nesse cenário que existe uma correlação forte entre a energia medida e a irradiância GHI, pois o coeficiente de correlação  $R^2$  é superior à 0,99. Em outras palavras, para essa UFV, na condição avaliada durante os 30 dias de performance, pode-se afirmar que para cada 1.000 Wh/m<sup>2</sup> registrado no dia, obtém-se 47,53 kWh ou 0,475 MWh.

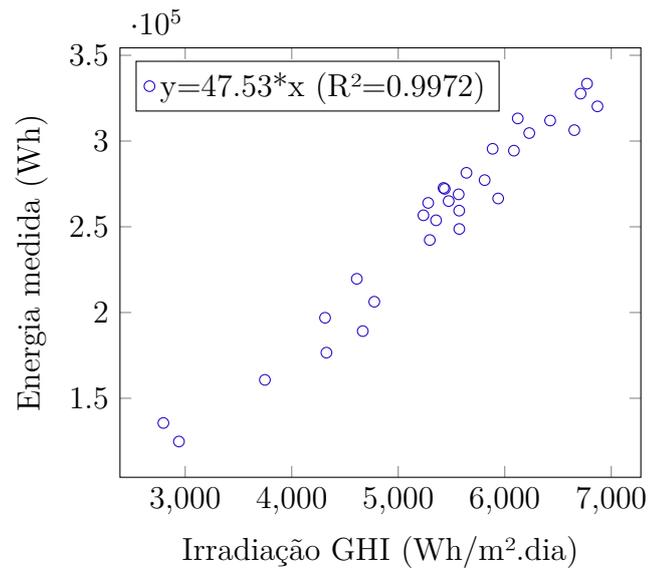


Figura 4.10 – Desempenho no período.

## 4.5 Lições aprendidas

### 4.5.1 Protocolos de comissionamento a frio e a quente

Os protocolos de comissionamento com circuito desenergizado (a frio) e com circuito energizado (a quente) são etapas predecessoras para que a UFV entre em teste de performance. Ao final de cada "equipamento" comissionado com sucesso, o protocolo de comissionamento deve ser emitido pela equipe responsável, assinado pela fiscalizadora e postado no sistema oficial de documentação da empresa. Mesmo que todo o fluxo de fiscalização e assinatura seja seguido, os tramites para inclusão no sistema e validação novamente na prática costuma demorar, pois depende de diversas pessoas para gerar número, *scanner*, inserir no sistema, validar, etc. Como lição aprendida, a Tabela 4.7 mostra a consolidação dos testes feitos pela fiscalização e que podem ser utilizados como formalização (em avanço) entre o cliente, BOS e a certificadora, permitindo seguir o fluxo para início do teste de performance.

Tabela 4.7 – Protocolos de comissionamento

	Teste a frio	Teste a quente	Protocolos entregues	Descrição
Aterramento	100%	100%	SIM	I - Equipotencialização, continuidade, tensão de passo e toque, resistência de aterramento, emissão de laudo
Transformador	100%	100%	SIM	II - Coleta de óleo, reaperto, inspeção, resistência de isolamento, TTR, RT, buchas, proteções intrínsecas, análise de óleo, etc.
Cubículo de MT	100%	100%	SIM	III - Torqueamento, testes mecânico, funcional, desumidificação, iluminação, ensaio no relés de proteção, etc.
Eletrocentro	100%	100%	SIM	IV - Reaperto, comissionamento nobreak, inversores, circuito de controle e potência, rede TO/TI, aterramento, limpeza, etc.
Stringbox	100%	100%	SIM	V - Continuidade, polaridade, resistência do arranjo, circuito aberto, torqueamento, toque e passo, etc.
Cabos	100%	100%	SIM	VI - Terminações eletrocentro e campo, resistência de isolação, tensão aplicada BTCC, BTCA e MT.
Estação meteorológica	100%	100%	SIM	VII - Certificação dos sensores, configuração e teste, validação da supervisão remota dos dados.
Rastreador Solar	100%	100%	SIM	VIII - Teste do posicionamento do rastreador, sensores da weather station, teste de vento.
	OK	OK	Liberado	

Fonte: Autor

#### 4.5.2 Checklist pré-performance

Para complexos de grande porte, pode ocorrer defasamento entre a entrada em operação comercial (DAPR-P) após o comissionamento a quente e o início do teste de performance. Quando essa diferença ultrapassa alguns meses, o equipamento pode não estar mais operando no seu ponto ótimo caso o time de O&M não tenha iniciado o ciclo de manutenção preventiva. Nesse sentido, como lição aprendida, foi desenvolvido um *checklist* pré-performance para avaliar a condição dos ativos e, se necessário, atuar antes do início das coletas de dados.

A Figura 4.11 apresenta o modelo de *checklist* e as informações a serem verificadas. Ao final, todos (cliente, O&M, BOS e fiscalização) devem assinar.

CHECK-LIST DE INSPEÇÃO - TESTE DE PERFORMANCE					
PROJETO:		ITS:		TAG:	
DATA:		LOCAL:		Nº DOCUMENTO:	
1 - INVERSOR					
ITEM	DESCRIÇÃO	C	NC	OBSERVAÇÃO	
1.1	Conferência de reaperto (QC-A/B, QL)				
1.2	Teste e verificação de hardware dos books				
1.3	Todos os book habilitados				
1.4	Versão de firmware atualizada			v2. ....	
1.5	Verificar comunicação com supervisor				
1.6	Parâmetros conforme última versão do backup WEG				
1.7	Teste de funcionamento / autonomia do nobreak				
1.8	Central de incêndio sem falha				
1.9	Bateria da central de incêndio conectada				
1.10	Tensão das baterias (nobreak)			..... V	..... %
1.11	Bobina BR-22 conectada				
2 - SALA ELÉTRICA					
ITEM	DESCRIÇÃO	C	NC	OBSERVAÇÃO	
2.1	Ajuste de termostatos INV A				
2.2	Ajuste de termostatos INV B				
2.3	Ajuste de termostatos SALA DE POTÊNCIA				
2.4	Ajuste de termostatos SALA DE COMANDO				
2.5	Verificar funcionamento dos exaustores				
2.6	Verificar ventiladores de teto sala de potência				
2.7	Filtros internos e externos (limpeza ou substituição)				
2.8	Temperatura coluna INV A - CA (RTD1)			.....	°C
2.9	Temperatura coluna INV A - CC1 (RTD2)			.....	°C
2.10	Temperatura coluna INV A - CC2 (RTD3)			.....	°C
2.11	Temperatura coluna INV B - CA (RTD1)			.....	°C
2.12	Temperatura coluna INV B - CC1 (RTD2)			.....	°C
2.13	Temperatura coluna INV B - CC2 (RTD3)			.....	°C
2.14	Temperatura sala de potência			.....	°C
2.15	Limpeza interno do eletrocentro / painéis				
2.16	Proteção passiva				
2.17	Estanqueidade das portas				
2.18	Proteção contra toque acidental instaladas e bem fixadas (BT CA / BT CC / QDSA)				
2.19	Verificar se as portas de acesso à sala de potências estão trancadas				
3 - TROCADOR DE CALOR					
ITEM	DESCRIÇÃO	C	NC	OBSERVAÇÃO	
3.1	Vazão sistema de refrigeração INV A			.....	L/min
3.2	Vazão sistema de refrigeração INV B			.....	L/min
3.3	Pressão sistema de refrigeração INV A			.....	bar
3.4	Pressão sistema de refrigeração INV B			.....	bar
3.5	Pressão sistema de refrigeração REMANESCENTE			.....	bar
3.6	Limpeza do trocador de calor / radiador				
3.7	Repressurização após 15 dias de operação				
3.8	Medição de BRIX do líquido refrigerante - INV A				
3.9	Medição de BRIX do líquido refrigerante - INV B				
3.10	Medição de BRIX do líquido refrigerante - REMANESCENTE				
3.11	Válvulas do sistema de refrigeração completamente abertas				
3.12	Chave seletora do cooling system em automático				
3.13	Status fluxo cooling system "Ligado"				
3.14	Status ventiladores INV A "Ligado"				
3.15	Status ventiladores INV B "Ligado"				
3.16	Status bomba de água INV A "Ligado"				
3.17	Status bomba de água INV B "Ligado"				
3.18	Chave seletora dos ventiladores em automático				
3.19	Verificação de vazamento em todas as bombas				
3.20	Verificação de acionamento dos motores dos ventiladores				
3.21	Verificação de conexões e torques (flanges)				
4 - TRANSFORMADOR					
ITEM	DESCRIÇÃO	C	NC	OBSERVAÇÃO	
4.1	Nível de óleo				
4.2	Temperatura do óleo			.....	°C
4.3	Temperatura do enrolamento			.....	°C
4.4	Inspeção visual de vazamentos				
4.5	Conferência relé de imagem térmica			.....	Ω
4.6	Conferência das válvulas dos radiadores				
5 - CAMPO (PV)					
ITEM	DESCRIÇÃO	C	NC	OBSERVAÇÃO	
5.1	Protocolos de cabos BT CC aprovados				
5.2	Protocolos de CAT-I aprovados				
5.3	Protocolos de CAT-II aprovados				
5.4	Ausência de cabos fora da barra CC				
5.5	Protocolo de inspeção e torque de string box aprovados				
5.6	Trackers operando corretamente em modo solar				
5.7	Fechamento de todas as string boxes				
5.8	Vegetação / sombreamento				
5.9	Limpeza dos módulos				
5.10	Conferir se disjuntores das NCU's foram substituídos por modelo C10 (QDSA)				
5.11	Conferência de conectores RJ45				
5.12	Comunicação estação solarimétrica				
5.13	Comunicação NCU's				
5.14	Integridade dos sensores da estação solarimétrica				
-----		-----		-----	
CLIENTE		O&M			
-----		-----		-----	
BOS		FISCALIZAÇÃO			

Figura 4.11 – Formulário do checklist pré-performance

## 4.6 Fluxograma macro

O fluxograma macro conforme Figura 4.12 ilustra as etapas do teste de performance, permitindo a todos os envolvidos conhecer o processo. Após o início do processo, o primeiro passo é avaliar os protocolos de comissionamento (4.5.1) e o checklist pré-performance (4.5.2), sendo estes aprovados a coleta de dados (3.15) pode ser iniciada. Após o período de avaliação (3.8) será emitido o relatório final aprovando ou reprovando a UFV no teste de performance conforme os critérios definidos no item 3.17.

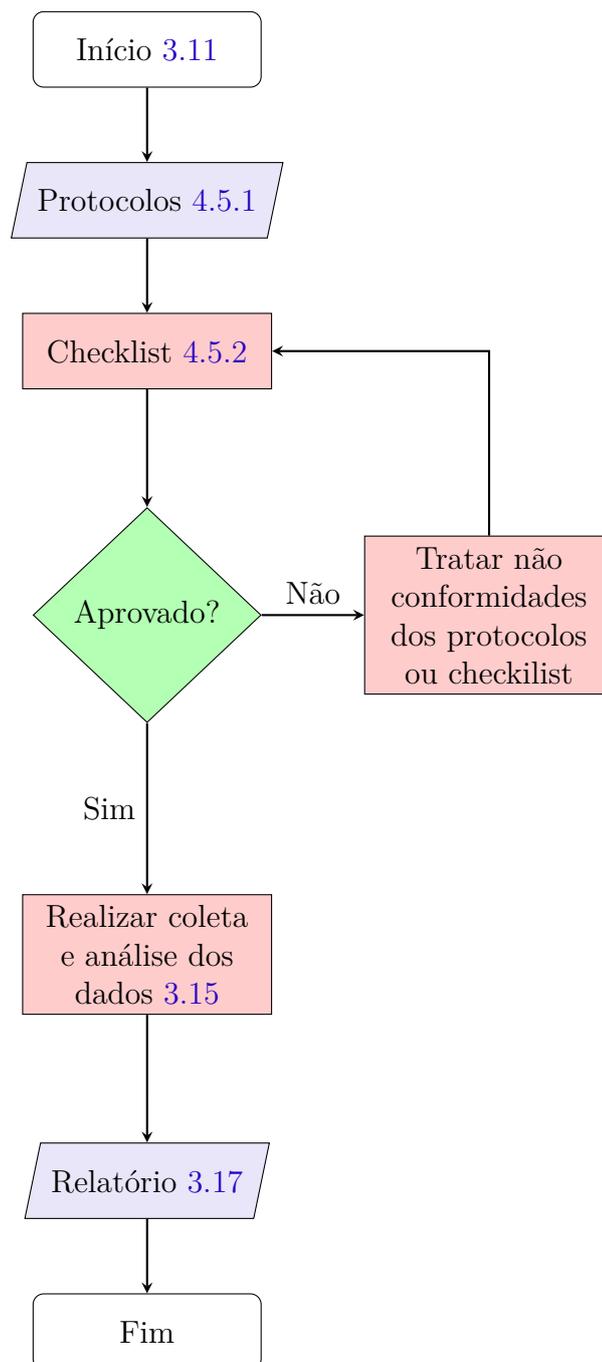


Figura 4.12 – Fluxograma macro do processo de avaliação de desempenho.

## 4.7 Matriz de comunicação

A matriz de comunicação pode ser vista na Tabela 4.8, basicamente três informações devem ser repassadas no período, sendo:

- Três dias antes de iniciar os testes, o Ponto Focal (P.F) da empresa contratante ou cliente deve enviar para todos os envolvidos (Cliente, BOS, O&M e Certificadora) um comunicado informando a data de início do teste de performance.
- Uma reunião semanal entre a Empresa certificadora (E.C) e o P.F deve ocorrer de forma a possibilitar o acompanhamento EPI.
- Mensalmente a E.C deve emitir o relatório final das UFVs aprovadas e enviar para validação com o cliente.

Tabela 4.8 – Matriz de comunicação

	Informação	De	Para	Motivo
D-3	Início de teste de performance na UFV	P.F	Todos	Evitar que intervenções programa ou não impactem na produção de energia
S-1	Acompanhamento dos indicadores	E.C P.F	Todos	Corrigir desvios que possam estar impactando a geração de energia
M-1	Relatório final	E.C	Cliente	Atestar a qualidade do projeto

Fonte: Autor

### 4.7.1 Proposta de informativo D-3 (Início do teste)

A Figura 4.13 apresenta o modelo de informativo a ser enviado a todos os envolvidos antes do início do teste de performance. Instruções envolvendo o O&M, fluxo de comunicação entre as partes e responsável pela operação devem ser de fácil acesso, além da data de início e término previsto.

Informação Pública

# INFORMATIVO

## 01

### UFV-S1

## Teste de performance

Início: 13/04

Término Previsto: 13/05

#### Orientações gerais:

- Toda e qualquer atividade que ocorrer nos parques em performance, deverá ser comunicada ao **O&M para autorização** e monitoramento. Sendo necessário informar:



Motivo da intervenção, descrição da atividade, local e a duração real.

Obs.: Essas informações serão repassadas para a certificadora

- Fluxo de comunicação em campo deve ser direcionado ao **"Fulano", O&M, na faixa "x" do rádio de comunicação.**
- Fluxo de programação de atividade, via e-mail, permanece o mesmo, devendo ser programado com pelo menos uma semana de antecedência.
- **Aos fiscais de campo**, é necessário proceder com a solicitação de autorização via rádio, antes da liberação da atividade ou abertura da Permissão de Trabalho.

Figura 4.13 – Informativo para início do teste de performance

### 4.7.2 Proposta de informativo S-1 e M-1 (EPI e relatório final)

Para o acompanhamento semanal, a Figura 4.14 apresenta uma proposta de informativo. Nele é possível visualizar:

- 1: Data de envio do informativo;
- 2: Representação da localização de todas as UFVs existentes no complexo;
- 3: Identificação da UFV com teste de performance em andamento;
- 4: Legenda;
- 5: *Status* e nome da UFV, seguindo do número do relatório final a ser cadastrado no sistema após o término do teste;
- 6: Campo de observação, disponível para destacar as orientações e recomendações após a reunião semanal.

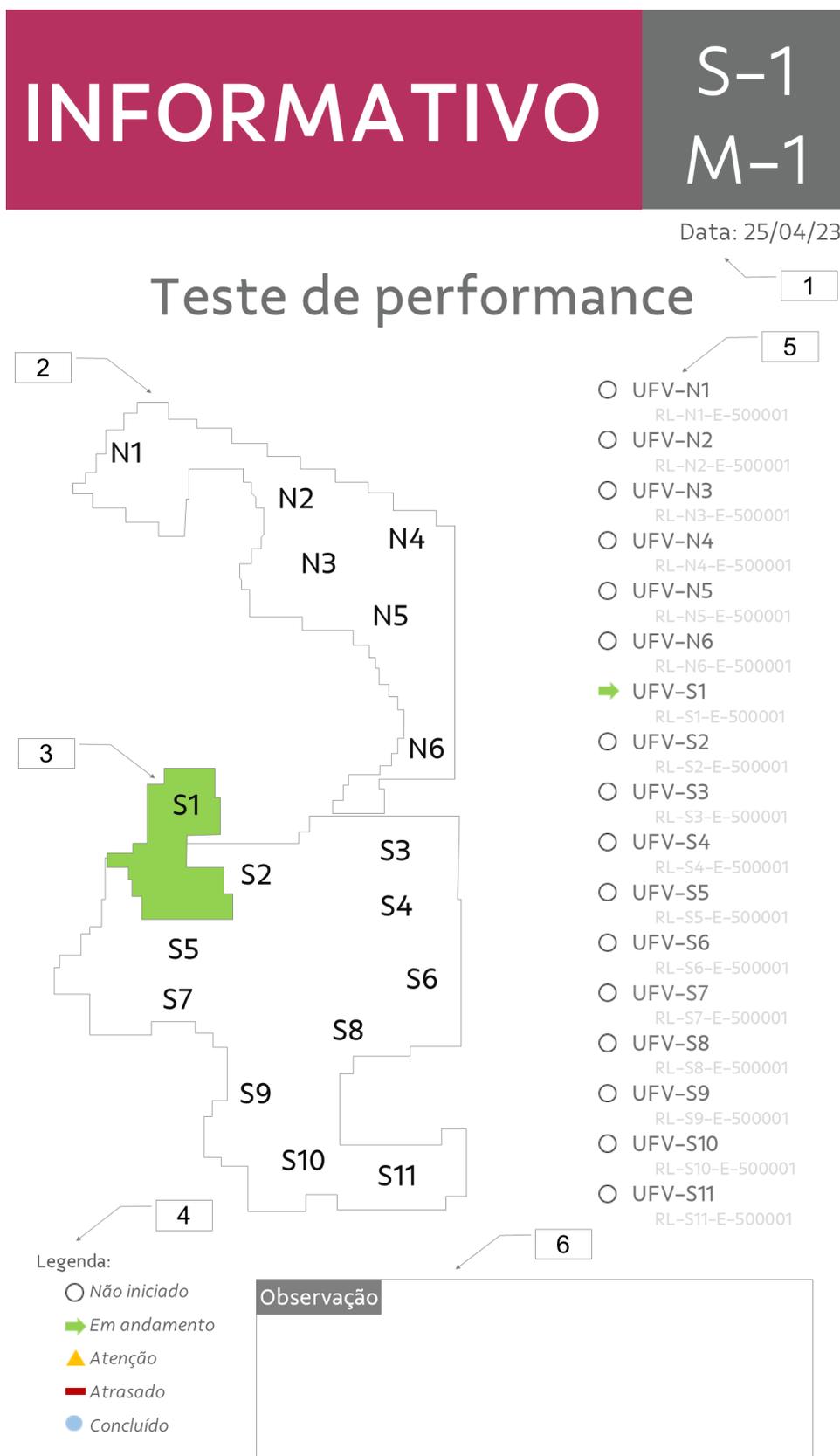


Figura 4.14 – Informativo para acompanhamento do teste de performance

# 5 Conclusões

## 5.1 Conclusões Gerais

Neste trabalho de pós-graduação foram analisados o comportamento de uma UFV de 40 MVA durante 30 dias, sendo analisado em detalhes a geração de energia em 3 dias específicos, representando um dia bom, dia ruim e, por fim, um dia de atenção.

O fluxograma proposto é um guia desenvolvido com base nas recomendações da Certificadora independente e definições internas de engenharia de uma grande geradora de energia fotovoltaica. O método e as etapas apresentadas podem ser adaptados às particularidades de qualquer usina fotovoltaica que esteja executando o teste de performance ou se programando para iniciar.

As condições e cenários existentes em uma usina de grande porte são diversos, sendo impossível mapear e documentar todas as possibilidades. Sendo assim, o trabalho registrou as lições aprendidas com a primeira UFV avaliada. Para as demais, novas situações não previstas podem surgir e devem ser tratadas e registradas de forma a garantir a melhoria contínua do processo.

A avaliação de projeto na forma tradicional, em que verifica-se "apenas" se o projeto alcançou a produção prevista no *business case*, não atende ao cenário atual e são substituídas por avaliação através de modelagem da planta e certificação por empresa especializada independente. Cabe ao contratante/cliente as modalidades disponíveis e, junto ao BOS, definir os critérios para contratação e certificação da planta.

Inicialmente, neste trabalho foi apresentada a metodologia a ser seguida para avaliação da performance de várias UFVs de um complexo. Na sequência o resultado, considerações e lições aprendidas foram expostos de forma a compartilhar todo conhecimento obtido na prática. Com isso, destacam-se:

- Quando avaliado o segundo e terceiro quartil da irradiância no plano horizontal *versus* a irradiância no plano inclinado, é possível observar uma diferença de 33,6% no acumulado do dia.
- O valor da mediana é 39,1% maior na UFV quando analisado o plano inclinado, confirmando os ganhos da utilização do sistema para rastreamento solar.
- Em dias ensolarados, a temperatura dos módulos solares elevam cerca de 30 °C nas duas primeiras horas dos dias, atingindo valores de 50 °C às 9h da manhã.

- Problemas de sombreamento no início e fim do dia são resultados de pequenas diferenças na cravação de estaca. Esse problema pode ser revolido empregando a função *TrueCapture* fornecida a parte pelo fabricante do rastreador solar.
- A rede de automação deve estar bem configurada, testada e, se possível, certificada de forma a permitir a troca de informações entre os equipamentos. Quando a comunicação falha por quaisquer motivo, os rastreadores solares aguardam pouco mais de 10 minutos antes de modularem para a posição de segurança, impactando na geração de energia da UFV.
- Os rastreador são projetados para assumirem a posição de segurança quando a velocidade do vento ultrapassa os valores definidos no projeto, sendo essa uma condição de proteção de ativo que ocorre raramente.
- O controle da planta via PPC é importantíssimo para evitar a violação do MUST, porém o sistema deve estar configurado e comissionado de forma a executar o correto ajuste do *setpoint* dos inversores. Nesse ponto, por ser um controle automático, o time de campo e a sala de operação devem reportar quaisquer comportamento estranho, como oscilações rápidas de *setpoint* em dias normais de geração.
- Restrições no sistema podem acontecer durante a execução do teste. Sempre que possível, é recomendado que o operador inicie a redução da geração a partir das demais UFVs que não estejam em teste. Caso não seja possível, esse dia será um dia excluído conforme critérios definidos previamente.
- Caso o dia de restrição não impacte de forma severa a produção de energia da UFV em performance, o cliente, em comum acordo com o BOS, pode solicitar que o dia não seja excluído sob pena de redução no EPI, desde que esses dias sejam suficientes para aprovação da UFV.
- Os protocolos de comissionamento e o *checklist* pré-performance são essenciais para execução de um bom teste de performance.
- O fluxograma macro deve ser de conhecimento de todos, facilitando o entendimento dos envolvidos e a tomada de decisão pelos responsáveis.
- A matriz de comunicação é uma das partes mais importantes para o bom andamento do teste, a sua execução nos prazo pelo responsável democratiza a informação e permite aos envolvidos atuarem de forma ativa se necessário.
- Por fim, destaca-se que os resultados alcançados na UFV são válidos exclusivamente para o período de teste e não podem ser extrapolados para outras UFVs como critério de aceitação.

# Referências

IEC61724. Photovoltaic system performance - part 1: Monitoring. In: IEC. *IEC61724*. [S.l.], 2021. 12

LUBKE, A. H. Resultado do teste de desempenho. In: 8.2 ESPECIALISTAS EM ENERGIAS RENOVÁVEIS – BRASIL LTDA. *8p2*. [S.l.], 2023. 26

VALE. Vale inicia geração de energia renovável do sol do cerrado. In: VALE S.A. *Meio Ambiente*. [S.l.], 2022. 10