



Grupo de Estudo de Geração Eólica, Solar e Armazenamento-GES

Testes de Comissionamento de Usinas Heliotérmicas

**PABLO DE ABREU LISBOA(1); LEONARDO DOS SANTOS REIS VIEIRA(1); ANA PAULA CARDOSO
GUIMARÃES(1);
CEPEL(1);**

RESUMO

Devido à complexidade operacional de uma planta heliotérmica, testes de comissionamento convencionalmente utilizados em plantas térmicas (não solares) não podem ser utilizados na íntegra. O objetivo deste trabalho é descrever o documento elaborado no âmbito do Projeto HelioTerm contendo o procedimento de testes de comissionamento e funcionais de plantas heliotérmicas e seus critérios de aceitação, tomando como base, uma planta piloto heliotérmica de 1 MWe. Os procedimentos para realização dos testes de comissionamento são aplicáveis a plantas comerciais, de maior capacidade, e poderá ser utilizado como referência em outros projetos com tecnologia similar.

PALAVRAS-CHAVE

heliotérmica, comissionamento, teste de aceitação

1.0 - INTRODUÇÃO

A predição de produção de eletricidade para instalações utilizando fontes de energia renováveis intermitentes são cruciais para avaliação econômica dos projetos das usinas. Para a energia solar fotovoltaica e a eólica, já existem normas fornecendo subsídios para projetistas, contratantes e entes financiadores, mesmo com a complexidade devida às flutuações operacionais presentes nos processos. Para plantas heliotérmicas, esta estimativa de desempenho pode se tornar ainda mais complexa devido à possibilidade de se armazenar a energia, controlando o momento do despacho, por meio da inserção de reservatórios térmicos ou mediante a hibridização com o uso dos combustíveis fósseis. Com o desenvolvimento de diversas plantas heliotérmicas no mundo na última década, tornou-se mais relevante a padronização dos critérios de avaliação de desempenho deste tipo de planta. Em 2017, o SolarPaces lançou um guia com o intuito de contribuir para a elaboração de uma metodologia padronizada para avaliação de rendimento de uma planta, ainda na sua fase de projeto (1). Apesar dos benefícios trazidos para todas as partes envolvidas em um projeto de planta, o documento não contempla modelos de garantia de desempenho, elemento essencial em todos os contratos.

O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) coordenou entre os anos de 2012 e 2017 um projeto de pesquisa visando à construção de uma planta piloto heliotérmica de 1 MWe na região do semiárido do Nordeste Brasileiro. O projeto de pesquisa, denominado HelioTerm, foi financiado em sua maior parte pela FINEP e contou com a parceria da Universidade Federal de Pernambuco e a Chesf. Um dos produtos obtidos neste projeto foi uma especificação técnica para um edital de licitação para construção da planta por uma empresa de EPC. Na elaboração desta especificação, o Cepel (contratante) contou com uma consultoria estrangeira. Entre os itens desta especificação há um documento específico sobre os testes de comissionamento e funcionais da planta a serem realizados pela empresa de EPC, e seus critérios de aceitação.

(1) Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro – sala 119 – Bloco A – CEP 21941-911 Rio de Janeiro - RJ – Brasil.

Tel: (+55 21) 2598-6227 – Fax: (+55 21) 2598-6000 – Email: pablisboa@cepel.br



Devido à complexidade operacional de uma planta heliotérmica, testes de comissionamento convencionalmente utilizados em plantas térmicas (não solares) não podem ser utilizados na íntegra. Em plantas heliotérmicas, a fonte de energia é intermitente e, portanto, há necessidade de se estabelecer critérios adicionais para garantir que a operação da planta encontra-se em condições estabilizadas durante os testes de comissionamento e de operação, para determinação de sua eficiência. Como não existe no Brasil nenhuma planta heliotérmica comissionada até o momento, não há referências sobre procedimentos de testes e critérios de aceitação para esta tecnologia.

O objetivo deste trabalho é descrever o documento elaborado no âmbito do Projeto Helioterm contendo o procedimento de testes de comissionamento e funcionais a serem realizados pela empresa de EPC e seus critérios de aceitação, tomando como base, a planta piloto heliotérmica de 1 MWe. Embora o documento tenha sido elaborado com base na planta piloto de 1 MWe, os procedimentos descritos são aplicáveis a plantas comerciais, de maior capacidade e poderá ser utilizado como referência em outros projetos com tecnologia similar.

2.0 - TESTES A SEREM REALIZADOS

O documento elaborado relaciona os procedimentos dos testes e valores limites de aceitação a serem exigidos da empresa de EPC. Os testes são os seguintes: testes de fabricação e produção antes do recebimento dos equipamentos, testes de conexão de rede, testes funcionais, testes de capacidade contratada, testes de desempenho de operação comercial, e testes de desempenho de longo prazo. Um plano dos testes deve ser elaborado e entregue ao contratante num prazo de no mínimo 120 dias antes do comissionamento da usina. Os procedimentos devem estar de acordo com aqueles prescritos no Power Test Code PTC-46, da ASME (2). Nas subseções seguintes são descritos os testes a serem realizados.

2.1 Testes de fabricação e produção

O contratante deve ter o direito de presenciar esses Testes de Fabricação e Produção que devem incluir, pelo menos: .

- testes do modo lógico e operacional do SCD (Sistema de Coleta de Dados);
- testes de balanceamento das pás da turbina e de giro do gerador;
- testes elétricos do gerador da turbina e do transformador principal;
- testes de pressão para os equipamentos que vão trabalhar sob condições de altas pressões e temperaturas;
- testes de pressão dos trocadores de calor, que deverão ser executados no local de fabricação;
- inspeções internas no tambor de vapor;
- testes de ajuste das válvulas de segurança;
- testes hidráulicos funcionais de fabricação das bombas principais (condensado, água de alimentação e bombas de HTF ("Heat Transfer Fluid"));
- testes de soldagem das juntas nos equipamentos de acordo com a edição 2010 da ASME, ASME Seção VIII, Divisão 1, Capítulo UW e ASME Seção IX.

2.2 Testes de comissionamento

O objetivo dos testes de comissionamento é verificar se os equipamentos atuam corretamente durante a operação contínua, a partida e o desligamento da planta. Os seguintes testes devem ser realizados:

- teste de pressão na montagem da tubulação;
- teste de giro do motor;
- teste de calibração nos instrumentos;
- teste das características do gerador para confirmar os diagramas de operação;
- testes de carga e alinhamento dos mancais;
- teste de vibração do gerador e da turbina a vapor;
- testes de loop no SCD.



O comissionamento deve ser realizado nos equipamentos e nos sistemas de acordo com as instruções do vendedor, se o vendedor as tiver emitido. Na ausência de tais instruções, o comissionamento deve ser realizado de acordo com as boas práticas de engenharia para avaliar se o equipamento atinge os critérios de desempenho especificados. A empresa de EPC deve possuir no local do projeto uma equipe consistindo de pelo menos um líder e outros engenheiros, necessários para conduzir os testes de comissionamento, que devem preparar, executar e comunicar efetivamente os procedimentos para a partida, o desligamento e a energização elétrica permanente durante o estágio de comissionamento. Além disso, a equipe deve executar a preparação para os primeiros enchimentos de lubrificantes e fluidos químicos, de transferência de calor, etc. Toda preparação deve ocorrer pelo menos 5 dias antes da atividade planejada. Todos os resultados dos testes devem ser fornecidos ao contratante, inclusive dos certificados de calibração de toda a instrumentação a ser utilizada.

2.3 Testes funcionais

Os testes funcionais devem começar após conclusão, com êxito, dos Testes de Comissionamento ou antes, se aprovados pelo contratante. Os principais testes funcionais são: eficiência do campo solar, eficiência e potência de saída do bloco de potência e adequação ambiental (emissões e ruído). Um relatório preliminar deve ser preparado em sete (7) dias e um relatório final deve ser preparado em trinta (30) dias após completado cada Teste Funcional. O relatório final deve incluir os dados como registrados, os certificados válidos de calibração para os instrumentos usados na execução dos testes e os cálculos de correção para ajustes das condições de projeto especificadas no contrato.

2.3.1 Procedimentos gerais

Os Testes Funcionais devem ser realizados com irradiação solar suficiente para manter a operação da usina sem interrupções e dentro de determinados critérios especificados nas seções seguintes. Os equipamentos devem estar operando nos limites de pressão, temperatura e escoamento especificados pelos respectivos fabricantes. Esses devem ser supridos por fonte de energia firme, pelo tempo que durar o teste. Um Critério de Aceitação Mínimo, detalhado mais adiante, deverá ser aplicado aos resultados dos Testes Funcionais. Em caso de desvios das condições de teste de referência, os valores garantidos característicos devem ser ajustados às condições reais de teste via curvas de correção, fornecidas pela empresa de EPC e aceitas pelo contratante. Entretanto, as condições de teste têm de estar dentro dos intervalos aceitáveis estabelecidos. Todas as medições devem ser executadas usando equipamentos de medição calibrados e certificados. Os manuais de operação e manutenção para o bloco de potência devem estar disponíveis para a empresa contratante previamente ao Teste Funcional.

Os testes compreendem dois períodos: período de estabilização (Fase de Estado Permanente) e período sob as condições de estado permanente (Fase de Medição do Teste). O período de estabilização corresponde ao período de tempo em que a planta CSP é colocada para operar até atingir um estado quasi-permanente sob condições operacionais estáveis com desvios máximos referentes ao campo solar e ao bloco de potência especificados para cada teste, individualmente. A Fase de Estado Permanente deve durar pelo menos 15 minutos, após estabilização da planta. A Fase de Medição do Teste corresponde ao período de tempo depois de alcançada a estabilização da planta onde se realizam as medições dos testes. A duração e os intervalos para os desvios máximos permitidos na Fase de Medição do Teste referentes ao campo solar e ao bloco de potência também são especificados para cada teste. A Fase de Medição do Teste deve durar pelo menos 60 minutos.

Os dados devem ser coletados em intervalos não maiores que 30 segundos. Destes, valores médios a cada 20 minutos devem ser determinados para a temperatura, vazão mássica, energia de saída bruta e líquida. Os resultados devem ser comparados com os valores característicos garantidos estipulados para o campo solar e para o bloco de potência. Todas as propriedades termodinâmicas, tais como densidade e entalpia específica do óleo térmico usado, devem ser fornecidas em tabelas ou formato de polinômio com antecedência aos testes. Os Testes Funcionais devem ser executados com todos os equipamentos auxiliares em operação, tais como bombas, válvulas, "drives", etc. quando isto for necessário para a operação da planta CSP inteira, de acordo com os manuais de Operação e Manutenção.

O campo solar, incluindo os painéis espelhados e os tubos absorvedores (HCE – "Heat collector element"),

devem ser lavados conforme as recomendações do fabricante, para se alcançar um fator de limpeza aceitável nos Testes Funcionais. O Fator de Limpeza dos Espelhos deve ser maior ou igual que 90,0% ($f_l \geq 90,0\%$). Não deve haver sombra entre os coletores do campo solar durante os testes. Isso dependerá da posição do sol e do arranjo do campo. Todos os conjuntos de coletores solares (SCA – “Solar collector assembly”) em teste devem rastrear o sol, maximizando a produção de energia térmica (operação normal do campo solar).

2.3.2 Procedimentos específicos - irradiação.

Para execução dos testes funcionais, as seguintes condições de irradiação precisam ser atendidas:

$$I_t \geq 700 \text{ W/m}^2$$

$$I_{\min} \leq I_t \leq I_{\max}$$

onde:

$$I_{\min} = 0,90 \cdot I_m$$

$$I_{\max} = 1,10 \cdot I_m$$

$$I_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n I_t$$

sendo:

- I_t o valor da irradiação direta normal no campo solar no tempo t
- I_{\min} o valor mínimo de irradiação direta normal no campo solar no tempo t
- I_{\max} o valor máximo de irradiação direta normal no campo solar no tempo t
- I_m o valor médio de irradiação direta normal no campo solar durante o teste
- n o número de amostras a serem usadas no cálculo.

2.3.3 Procedimentos específicos – vazão do óleo térmico.

Para execução dos testes funcionais, as seguintes condições de vazão do óleo térmico precisam ser atendidas:

$$Q_{i,\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,\max}$$

onde

$$Q_{i,\min} = 0,90 \cdot Q_{i,m}$$

$$Q_{i,\max} = 1,10 \cdot Q_{i,m}$$

$$Q_{i,m} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n Q_{i,t}$$

sendo:

- $Q_{i,t}$ o valor da vazão volumétrica de óleo térmico na entrada da seção i do campo solar durante o tempo t
- $Q_{i,\min}$ o valor mínimo de vazão volumétrica de óleo térmico na entrada da seção i do campo solar durante o teste
- $Q_{i,\max}$ o valor máximo de vazão volumétrica de óleo térmico na entrada da seção i do campo solar durante o teste
- $Q_{i,m}$ o valor médio de vazão volumétrica de óleo térmico na entrada da seção i do campo solar durante o teste.
- n o número de amostras a serem usadas no cálculo.

2.3.4 Procedimentos específicos – temperatura do óleo térmico.

Para execução dos testes funcionais, as seguintes condições de temperatura do óleo térmico precisam ser atendidas:

$$T_{i,\min} \leq T_{i,t} \leq T_{i,\max}$$

onde

$$T_{i,\min} = 0,90 \cdot T_{i,m}$$

$$T_{i,\max} = 1,10 \cdot T_{i,m}$$

$$T_{i,m} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n T_{i,t}$$

$$270^\circ\text{C} \leq T_{i,m} \leq 320^\circ\text{C}$$

sendo:

- $T_{i,t}$ o valor da temperatura de óleo térmico na entrada da seção i do campo solar durante o tempo t
- $T_{i,\min}$ o valor mínimo de temperatura de óleo térmico na entrada da seção i do campo solar durante o teste
- $T_{i,\max}$ o valor máximo de temperatura de óleo térmico na entrada da seção i do campo solar durante o teste
- $T_{i,m}$ o valor médio de temperatura de óleo térmico na entrada da seção i do campo solar durante o teste; o valor indicado refere-se à plantas que utilizam o óleo Theminol VP1, ou equivalente, como fluido térmico
- n o número de amostras a serem usadas no cálculo.

2.3.5 Teste de eficiência do campo solar

A eficiência do campo solar (A) consiste na relação entre a energia térmica transmitida para o fluido de transferência térmica (HTF) por cada seção do campo solar (M) e a energia solar incidente em cada seção do campo solar (N), calculada pela irradiação direta normal multiplicada pela área de abertura do espelho do SCA no modo de rastreamento. Portanto:

$$A = \frac{M}{N}$$

Os valores devem ser calculados de acordo com as seguintes equações:

$$A = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n \frac{\sum_{i=1}^x Q_{i,t} \cdot \rho_{i,t} \cdot \Delta h_{i,t}}{S_t \cdot I_t}$$

e

$$S_t = S_c - S_{d,t}$$

onde:

- n é o número de amostras a serem usadas no cálculo
- t índice da amostra (tempo)
- x número de seções do campo solar
- i índice de cada seção do campo solar
- $Q_{i,t}$ vazão volumétrica de HTF através da entrada de cada seção i do campo solar no tempo t
- $\rho_{i,t}$ densidade do HTF na entrada da seção i do campo solar no tempo t

- $\Delta h_{i,t}$ aumento na entalpia do HTF produzida em cada seção i do campo solar no tempo t
- S_t área de abertura do espelho dos coletores rastreadores
- S_c área total de abertura do campo solar
- $S_{d,t}$ área de abertura do espelho dos coletores não-rastreadores
- I_t irradiação direta normal no campo solar no tempo t

O aumento da entalpia $\Delta h_{i,t}$ deve ser medido considerando a temperatura do HTF na entrada e na saída da seção i do campo solar e calculado baseado nas propriedades termodinâmicas do fluido fornecidas pela empresa EPC. A duração do teste de eficiência do campo solar deve ser de 60 minutos (Fase de Medição do Teste), iniciado após a estabilização (Fase de Estado Permanente).

Os seguintes parâmetros de referência determinam o Ponto de Referência (PR) para o teste e devem ser usados para calcular os Valores Garantidos (ver Critério de Aceitação Mínimo – Seção 6):

- Ângulo de incidência: 0° (raios de sol normais à abertura)
- Fator de limpeza: $f_l = 100\%$
- Disponibilidade do campo solar: 100%
- Velocidade de vento: 0 m/s
- Irradiação direta normal: $DNI = 1000 \text{ W/m}^2$
- Espelhos quebrados/danificados: 0
- Tubos dos coletores (HCE) quebrados/danificados: 0

Se as condições dos Testes Funcionais diferirem dos parâmetros do ponto de referência indicado acima, o valor garantido da eficiência térmica do campo solar (A_g) deve ser corrigido de acordo com as equações seguintes:

$$A_{g,c} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(B \cdot F(\phi_t) \cdot F_{LIMP} - \frac{(C + D \cdot v_t) \cdot \frac{S_c}{S_t}}{I_t} - \frac{C' \cdot \frac{S_c}{S_t}}{I_t} \right)$$

e

$$S_t = S_c - S_{d,t}$$

onde:

- $A_{g,c}$ é o valor garantido corrigido da eficiência térmica do campo solar
- n o número de amostras a serem usadas no cálculo de $A_{g,c}$
- t índice da amostra (tempo)
- I_t irradiação direta normal no campo solar no tempo t
- ϕ_t ângulo de incidência solar no tempo t
- B coeficiente de eficiência ótica
- $F(\phi_t)$ fator de correção do ângulo de incidência
- F_{LIMP} fator de correção devido à limpeza dos espelhos e dos tubos do HCE
- C coeficiente de perdas térmicas do campo solar (tubos do HCE)
- C' coeficiente de perdas térmicas do campo solar (tubulação)
- D coeficiente de perdas térmicas incrementais devido ao vento
- S_t área de abertura de espelho dos coletores rastreadores
- S_c área de abertura de espelho total do campo solar
- $S_{d,t}$ área de abertura de espelho dos coletores não rastreadores no tempo t

O fator de correção do ângulo de incidência ($F(\phi_t)$) é calculado pela seguinte fórmula, com $\phi_t > 0$ em graus.

$$F(\phi_t) = (\cos(\phi_t) + F_1 \cdot \phi_t + F_2 \cdot \phi_t^2) / \cos(\phi_t)$$

onde F_1 e F_2 são parâmetros de primeira e segunda ordem, respectivamente.

Não podem ser aplicados fatores de correção para espelhos quebrados, ou má condição operacional dos absorvedores, tais como vidros quebrados ou perda de vácuo. O fator F_{LIMP} corrige a eficiência térmica de referência de uma seção devido às condições e à limpeza dos painéis espelhados e dos tubos do HCE. A metodologia para o cálculo deste fator deve ser definida em detalhe durante o projeto e deve seguir a seguinte fórmula:

$$F_{LIMP} = f_{lm} \cdot \left(1 - \frac{(1 - f_t)}{2} \right)$$

onde f_{lm} considera a sujeira nos espelhos (redução da refletividade) e f_t considera a sujeira no tubo absorvedor (redução da transmissividade).

2.3.4 Teste do bloco de potência

A eficiência bruta do bloco de potência (D) consiste na relação entre a potência elétrica ativa medida nos terminais do gerador (O) e a potência térmica transferida pelo HTF ao gerador de vapor (P), sendo medida diretamente no lado do HTF antes e depois dos trocadores de calor. Portanto:

$$D = \frac{O}{P}$$

e o seu valor deve ser calculado como a seguir:

$$D = \frac{1}{n} \cdot \sum_{t=1}^n \frac{O_t}{Q_t \cdot \rho_t \cdot \Delta h_t}$$

onde:

- n é o número de amostras a serem usadas no cálculo
- t índice da amostra (tempo)
- O_t potência elétrica ativa medida nos terminais do gerador no tempo t
- Q_t vazão volumétrica do HTF no gerador de vapor no tempo t
- ρ_t densidade do HTF na entrada do gerador de vapor no tempo t
- Δh_t redução da entalpia do HTF no gerador de vapor no tempo t

A redução da entalpia Δh_t deve ser medida considerando a temperatura do HTF na entrada e na saída do gerador de vapor. A duração do teste de eficiência do bloco de potência deve ser de 60 minutos (Fase de Medição do Teste), iniciando após a estabilização (Fase de Estado Permanente).

Os seguintes parâmetros de referência determinam o Ponto de Referência (PR) e devem ser usados para calcular os Valores Garantidos. O parâmetro de vazão volumétrica se refere à planta de 1 MWe e deve ser ajustado para plantas de outras capacidades.

- Vazão volumétrica do HTF: $Q_t = 20, 7 \text{ kg/s}$
- Temperatura do HTF na entrada/saída do trocador de calor: $392,0 / 292,0^\circ\text{C}$
- Velocidade do vento: 0 m/s
- Temperatura ambiente: 35°C
- Frequência da rede: 60Hz
- Fator de potência: $0,80$

- "Blow down" do ciclo água/vapor: 0%
- Todos os pré-aquecedores do ciclo em operação normal
- Isolamentos e válvulas em bom estado para minimizar a perda de calor do ciclo

Se as condições dos Testes Funcionais diferirem do ponto de referência indicado acima, o valor garantido (D_g) deve ser corrigido de acordo com as curvas de correção correspondentes, fornecidas pela empresa de EPC e aprovadas pela empresa contratante. As curvas de correção devem contemplar pelo menos todas as condições de referência descritas acima.

3.0 - TESTE DE CAPACIDADE CONTRATADA

O Teste de Capacidade Contratada da usina CSP pode ser executado durante os Testes Funcionais do bloco de potência. Neste teste, a avaliação é feita sobre o valor da potência elétrica ativa no medidor da subestação de manobra e antes do transformador da planta. Além dos parâmetros de referência acima definidos no teste do bloco de potência, para o teste de capacidade contratada, os seguintes parâmetros adicionais são definidos para o cálculo dos Valores Garantidos:

- Pressão ambiente: 980 mbar
- umidade relativa: 44%

Todos os dados do Teste de Capacidade Contratada devem ser usados como medidos, sem nenhuma correção relacionada a desvios padrão ou correções baseadas em incertezas de medição do equipamento medidor. Se o Teste de Capacidade Contratada falhar, o teste deverá ser repetido, incluindo os testes de eficiência do campo solar e do bloco de potência.

Se as condições durante o Teste de Capacidade Contratada diferirem das condições do ponto de referência indicado acima, o valor garantido (E_g) deve ser corrigido de acordo com as curvas de correção correspondentes, fornecidas pela empresa de EPC e aprovadas pela empresa contratante. As curvas de correção devem contemplar pelo menos todas as condições de referência descritas acima.

4.0 - TESTE DE DESEMPENHO DE OPERAÇÃO COMERCIAL

Uma vez completados os Testes Funcionais e os Testes de Comissionamento, a usina CSP vai estar pronta para o Teste de Desempenho de Operação Comercial. O teste deve ser executado em um período de tempo ininterrupto de pelo menos 14 dias. A ausência de irradiação suficiente para operar a usina CSP não é considerada como uma interrupção. Somente eventos fora do controle da empresa EPC são aceitos como interrupção, tais como indisponibilidade da rede. No caso de tais interrupções, a empresa de EPC deve documentar apropriadamente o evento e o tempo em que ocorreu a interrupção e informar à empresa contratante imediatamente sobre o fato. Uma vez resolvida a causa da interrupção, as duas empresas vão acordar sobre o tempo de início para continuar com o teste.

A usina CSP deve estar operando em modo de operação regular, de acordo com os manuais de Operação e Manutenção, e deve conseguir alcançar a energia de saída prevista no Modelo de Potência da Usina. Este consiste no modelo de simulação da planta, que deve ser fornecido pela empresa de EPC e reflete o comportamento esperado da usina considerando todos os parâmetros técnicos relevantes (i.e. potência de saída) em diferentes condições operacionais (irradiação, temperatura etc.). A energia de saída obtida durante o Teste de Desempenho de Operação Comercial deve ser medida no medidor da subestação de manobra e antes do transformador de saída, sem nenhuma correção relacionada a desvios padrão ou correções baseadas em incertezas de medição do equipamento medidor. Durante o teste, todos os sistemas devem estar operando completamente e adequadamente.

O procedimento geral e as disposições do Teste de Desempenho de Operação Comercial são os mesmos exigidos para o Teste de Desempenho de Longo Prazo (Seção 5), salvo que: (i) a duração do teste é de 14 dias e (ii) somente a energia de saída equivalente esperada, prevista no Modelo de Potência da Usina CSP, vai ter

Valor Garantido para o teste (ver seção 6). O SCD deve estar completo e finalmente programado. O treinamento da equipe de O&M já deve estar finalizado.

O Teste de Desempenho de Operação Comercial deverá ser repetido se:

- a energia de saída equivalente real produzida pela usina CSP durante o período de 14 dias for menor que o valor esperado calculado pelo Modelo de Potência da Usina CSP, reduzido pelo VLT (ver seção 6)
- a usina CSP não conseguir operar de acordo com os requisitos da rede
- a radiação direta normal não for maior que 500 W/m² durante pelo menos 70% do tempo entre o nascer e o pôr do sol em pelo menos 10 dias de teste.

Se o Teste de Desempenho de Operação Comercial não obtiver sucesso depois dos 14 dias citados acima, então o teste deve ser repetido ou estendido.

5.0 - TESTE DE DESEMPENHO DE LONGO PRAZO

Uma vez terminado o Teste de Desempenho de Operação Comercial e ser declarada a Operação Comercial, o Teste de Desempenho de Longo Prazo terá início imediatamente, com duração de 60 dias consecutivos e sem que nenhum fator de degradação seja aplicado.

Para o Teste de Desempenho de Longo Prazo as seguintes condições devem ser satisfeitas:

1. Informar arquivo de clima anual com dados do Ano Meteorológico Típico (TMY)
2. Não deve haver restrições de rede para a exportação da energia líquida
3. Não deve haver restrições de fornecimento de combustível fóssil
4. A operação da usina CSP deve estar de acordo com o Manual de Operação e Manutenção
5. Não deve haver interrupções programadas (zero dias)
6. Interrupções não programadas não devem ultrapassar 2,5% das horas de operação da turbina
7. A disponibilidade média do campo solar deve ser de 99%
8. O fator de limpeza médio total deve ser de 97%, calculado como o produto do fator de limpeza dos espelhos (98%) pelo fator de limpeza dos tubos absorvedores (99%)
9. Taxa anual de espelhos quebrados/danificados deve ser de 0,25%
10. Taxa anual de tubos absorvedores quebrados/danificados deve ser de 0,5%.

No caso de haver algum desvio dos dados de referência listados acima nos itens de 5 a 10, todos os resultados do Modelo de Potência da Usina CSP deverão ser corrigidos/ajustados. Para os itens de 1 a 3, os dados de referência devem ser corrigidos seguindo os princípios a seguir:

- Para parâmetros diferentes dos dados de referência, valores reais dos parâmetros devem ser medidos durante o período de teste e usados como entrada de dados no Modelo de Potência da Usina CSP, usando a metodologia descrita no manual do usuário do Modelo e na documentação técnica.
- Se houver, durante o Teste de Desempenho de Longo Prazo, qualquer desvio de um parâmetro de operação que seja dado de entrada do Modelo de Potência da Usina CSP, o Modelo de Potência da Usina CSP deve ser modificado, em concordância de ambas as partes, se uma mudança nesse parâmetro causar um decréscimo na Energia de Saída devido a razões fora da responsabilidade da empresa de EPC.

6.0 - CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO MÍNIMO

Os Testes Funcionais, o Teste de Capacidade Contratada e o Teste de Desempenho de Operação Comercial serão aceitos se o valor medido do parâmetro estiver de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Valor medido} > VLT \cdot \text{Valor garantido}$$

onde:

- *Valor medido* será obtido de acordo com os procedimentos detalhados dos testes e sem a aplicação de nenhuma incerteza de medição.
- *VLT* significa a aplicação do Valor Limite de Teste para cada teste executado
- *Valor Garantido* significa o valor garantido para cada teste (ver Tabela 1).

Os Testes Funcionais terão sucesso se: (i) todos os valores garantidos forem alcançados e (ii) as condições dos testes forem cumpridas. Se a empresa de EPC falhar em algum Teste Funcional a usina deve ser corrigida e o teste repetido até ser aprovado.

A Tabela 1 mostra os Valores Garantidos e os Valores Limites de Teste para os Testes Funcionais, Teste de Capacidade Contratada e Teste Desempenho de Operação Comercial.

Tabela 1 – Valores garantidos e Valores Limites de Teste para os Testes Funcionais, Teste de Capacidade Contratada e Teste Desempenho de Operação Comercial

Testes Funcionais	Variável.	Unidade	Valores Garantidos (EPC)	Valores Limites de Teste
Eficiência do Campo Solar	<i>Ag</i>	-	%	90%
Eficiência Bruta do Bloco de Potência	<i>Dg</i>	-	%	90%
Teste de Capacidade Contratada, líq.	<i>Eg</i>	MW	> 1, 0 MWe*	100%
Teste de Desempenho de Operação Comercial (antes da DOC)	-	MWh		90%
Teste de Adequação Ambiental			N.A.	N.A.

*Válido para a planta de 1 Mwe

7.0 - CONCLUSÃO

Devido à complexidade operacional de uma planta heliotérmica cuja fonte de energia é intermitente, os testes de comissionamento convencionalmente utilizados em plantas térmicas (não solares) não podem ser utilizados na íntegra. Critérios adicionais para garantir que a operação da planta encontra-se em condições estabilizadas durante os testes de comissionamento, para determinação de sua eficiência são necessários.

Neste trabalho foram apresentados os parâmetros para realização de testes de comissionamento e funcionais a serem realizados pela empresa de EPC e seus critérios de aceitação, tomando como base, uma planta piloto heliotérmica de 1 MWe. De uma forma geral, os testes são realizados em duas fases. A primeira corresponde ao período em que a planta é colocada para operar em estado quasi-permanente sob condições estáveis e é mantida nestas condições por um tempo mínimo de 15 minutos. Na segunda fase são realizadas as medições e tem duração mínima de 60 minutos. Nestas fases, são impostos limites para variações da irradiação e para variações da vazão e temperatura do fluido térmico. O não cumprimento destes limites exige a repetição do teste. O teste de operação comercial deve abranger um período mínimo de 14 dias sem interrupção, a menos da ausência de irradiação e os testes de longa duração, um período de pelo menos 60 dias consecutivos e sem que nenhum fator de degradação seja aplicado.

Embora o documento tenha sido elaborado com base numa planta piloto heliotérmica de 1 MWe, os procedimentos descritos são aplicáveis a plantas comerciais, de maior capacidade e poderá ser utilizado como referência em outros projetos de energia solar que utilizem fluido térmico como elemento de ligação entre o campo solar e o bloco de potência.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) HIRSCH, et al., SolarPACES guideline for Bankable STE Yield Assessment, 2017 <disponível em: <https://www.solarpaces.org/>, >.

(2) ASME, Power Test Code PTC-46

(1) Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro – sala 119 – Bloco A – CEP 21941-911 Rio de Janeiro - RJ – Brasil.

Tel: (+55 21) 2598-6227 – Fax: (+55 21) 2598-6000 – Email: pablisboa@cepel.br



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

3653
GES/17

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Pablo de Abreu Lisboa:

Nascimento: Rio de Janeiro, RJ, 16/05/1980;

Formação: graduação em Engenharia Mecânica pela UERJ em 2004 / mestrado em Engenharia Mecânica pela UERJ em 2012;

Leonardo dos Santos Reis Vieira:

Nascimento: Rio de Janeiro, RJ, 16/06/1962;

Formação: graduação em Engenharia Mecânica pelo IME em 1984 / mestrado em Engenharia Mecânica pela PUC-RJ em 1993 / doutorado em Engenharia Mecânica pela COPPE/UFRJ em 2003.

Ana Paula Cardoso Guimarães:

Nascimento: Uberlândia, MG, 09/04/1964;

Formação: graduação em Engenharia mecânica pela PUC Minas em 1990 / mestrado em Engenharia Mecânica pela UFMG em 1995 / doutorado em Engenharia Mecânica pela COPPE-UFRJ em 2003.