



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

Influência de Estratégias e Parâmetros de Operação para o Armazenamento Térmico e Produção de Energia Elétrica em Usina Termossolar

RODRIGO CANESTRARO QUADROS(1); ALESSANDRO PRESZNHUK FILHO(2); KRISTIE KAMINSKI KUSTER(3); RENATO DE ARRUDA PENTEADO NETO(4); LUIS ALEXANDRE CATUSSI PASCHOALOTTO(5); ANA PAULA OENING(6); LACTEC(1);LACTEC(2);LACTEC(3);LACTEC(4);CESP(5);LACTEC(6);

RESUMO

Tecnologias de geração por concentração solar vêm atraindo atenções no setor elétrico pela despachabilidade e disponibilidade; plantas termossolares, quando equipadas com sistemas de armazenamento térmico, apresentam essas vantagens em relação as outras tecnologias renováveis. Neste estudo foi desenvolvido um algoritmo físico-matemático para determinar a geração pela planta termossolar e a influência das estratégias e parâmetros de operação no armazenamento térmico. Esse estudo é parte do projeto de P&D Estratégico (Chamada Pública 019/2015-ANEEL): "Implantação de Usina Piloto por Meio de Integração da Fonte de Geração Termossolar ao Complexo de Energias Alternativas Renováveis da UHE Porto Primavera", em parceria com a CESP.

PALAVRAS-CHAVE

Armazenamento, Despachabilidade, Eficiência, Geração, Termossolar

1.0 - INTRODUÇÃO

O crescimento de ativos no setor de energias renováveis tem fomentado a implantação de novas tecnologias ou a evolução de técnicas inovadoras. Nesse âmbito, a geração de energia solar através da concentração de raios solares tem se expandido em território nacional, com o uso de novas ou aprimoradas tecnologias. Plantas de concentração da irradiação solar ou CSP (*concentrating solar power*), possuem o potencial de geração renovável em grande escala e a baixo custo, características de grande interesse do setor energético. Visando superar as oscilações na produção de energia, as plantas termossolares são equipadas com sistemas de armazenamento de energia térmica. Uma das soluções para redução de custos de implantação em usinas termossolares é a adoção de tanque único para armazenamento direto do fluido de trabalho ou HTF (*heat transfer fluid*), técnica conhecida como armazenamento em tanque Thermocline. Nesse artigo será apresentada uma abordagem voltada a influência de estratégias e parâmetros de operação para o armazenamento térmico e produção de energia elétrica em usina termossolares. Como um estudo de caso, será utilizada a planta termossolar desenvolvida sob o projeto de P&D Estratégico da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) na Chamada Pública 019/2015 "Implantação de Usina Piloto por Meio de Integração da Fonte de Geração Termossolar ao Complexo de Energias Alternativas Renováveis da UHE Porto Primavera" conjuntamente com a Companhia Energética de São Paulo (CESP).

A planta CSP e conseqüentemente o tanque Thermocline avaliado nesse estudo possuem variações de temperatura de trabalho entre as zonas fria e quente variando entre 240°C e 350°C. As análises da degradação da camada onde há o gradiente de temperatura do HTF será realizada para todas as fases de operação do tanque, em conjunto com as estratégias de operação da planta CSP. A análise da eficiência em função do tempo de operação será comparada para diversas estratégias de operação do tanque Thermocline, e ao final, poderá

ser verificada a quantidade de energia térmica presente no tanque e disponível para utilização na usina, em cada um dos cenários.

A Análise de todos os modos de operação, comparação entre modos de funcionamento do tanque Thermocline, eficiências e outras características serão realizadas através de um algoritmo que representa um modelo físico-matemático da planta CSP e que foi desenvolvido especificamente para a planta de UHE Porto Primavera. Esse algoritmo apresenta uma análise discreta dos elementos que compõem as tubulações e componentes por onde passam o HTF, durante o processo de troca e armazenamento térmico, para posterior geração de energia elétrica.

2.0 - USINA TERMOSSOLAR

A Planta termossolar consiste de três blocos fundamentais de operação, sendo eles: campo solar, armazenamento e bloco de potência. A irradiação solar incidente no campo solar (CS) é coletada nos receptores, que são tubos especiais com HTF em seu interior; quando atinge-se a temperatura de trabalho através da circulação do óleo nos coletores, o HTF é encaminhado ao tanque de armazenamento, permitindo um *buffer* de geração. O óleo do tanque é então enviado ao bloco de potência (PB), onde troca calor com a água para geração de vapor e operação em um ciclo Rankine, usualmente através de conjuntos turbo-geradores. Para o estudo aqui realizado, foi utilizado como base o projeto da planta termossolar de Porto Primavera. Na Figura 1 é apresentado um desenho esquemático da operação básica de uma planta termossolar, com a exceção de que o armazenamento de HTF é realizado em tanque único.

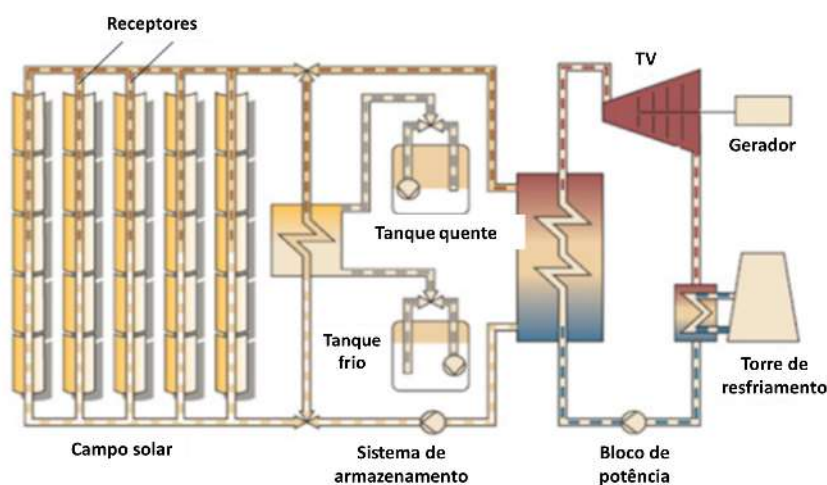


FIGURA 1 – Desenho esquemático de uma planta termossolar com armazenamento em dois tanques. Fonte: GIZ, MCTI, 2014.

No estudo considerado, a tecnologia de absorção da irradiação solar utilizada foi de coletores (calhas) parabólicos de foco linear em concentração contínua. Após a circulação do HTF no campo solar, este quando na temperatura de trabalho (350°C) é enviado à parte superior do sistema de armazenamento único ou tanque Thermocline. O sistema de armazenamento único mantém, em apenas uma estrutura de armazenamento, o HTF nas temperaturas de operação nominais, 240°C e 350°C, respectivamente como armazenamento de HTF frio e HTF quente. Quando se atinge uma quantidade mínima estabelecida de HTF quente armazenado, utiliza-se dele para trocar calor com outro fluido (água no estado líquido e vapor), para utilização em uma turbina a vapor (ciclo Rankine). Neste processo, o fluido de trabalho do ciclo do CS cede calor, retornando ao fundo do tanque, com temperatura próxima a 240°C.

2.1 Outras Tecnologias de Geração CSP

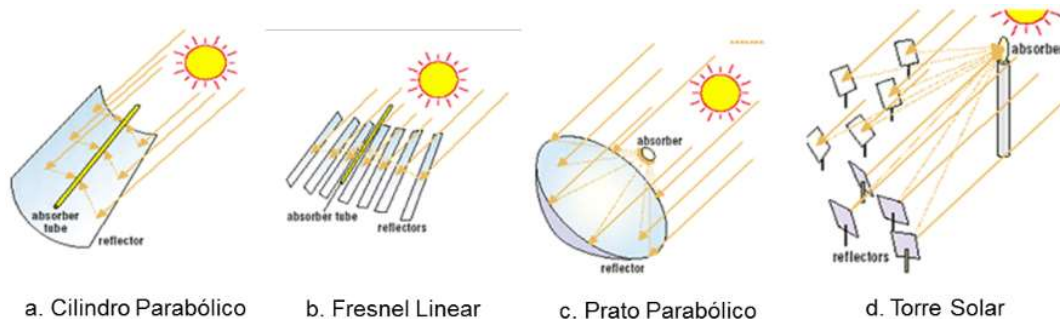


FIGURA 2 – Tipos de tecnologias de concentração solar. Fonte: DLR – enerMENA.

As tecnologias de concentração solar para geração de energia podem ser distribuídas em duas principais características ou atributos, que é o tipo de concentração solar (contínua ou discreta) e o foco (linear ou pontual). A combinação entre esses dois atributos resultam em quatro diferentes tecnologias de geração CSP, as quais são as mais utilizadas. Citam-se na Figura 2, as tecnologias mais usuais de concentração da irradiação solar:

- a. Cilindro Parabólico – Concentração contínua, foco linear;
- b. Fresnel Linear – Concentração discreta, foco linear;
- c. Prato Parabólico – Concentração contínua, foco pontual;
- d. Torre Solar – Concentração discreta, foco pontual.

Cada tecnologia apresenta condições diferentes de operação e são utilizadas de forma distintas, desde as temperaturas de trabalho, coeficientes de concentração solar – razão entre área do refletor e área do coletor, fluido de trabalho, ciclos de geração, geração direta (um ciclo e um fluido de trabalho entre CS e PB) ou indireta (mais de um ciclo e um ou mais fluidos de trabalho).

3.0 - TANQUE DE ARMAZENAMENTO THERMOCLINE

Tanques Thermocline armazenam HTF quente e frio, separados pelo efeito de estratificação de temperaturas, ou seja, pela diferença de densidade do fluido. A operação de uma usina CSP com sistema de armazenamento por tanque Thermocline requer um dimensionamento realizado de forma detalhada e cuidadosa, uma vez que as condições de operação do tanque alteram fundamentalmente o armazenamento de fluido na temperatura de trabalho, como também a disponibilidade de geração de energia elétrica.

Um dos principais problemas relacionados a esses tanques de armazenamento único é a degradação da zona Thermocline, ou apenas degradação do Thermocline, caracterizada pelo aumento da espessura da camada onde há um gradiente de temperatura entre as temperaturas de trabalho frio e quente, devido à troca térmica entre as zonas de diferentes temperaturas. O aumento da zona Thermocline implica na redução da energia disponível para geração e na redução da eficiência energética da planta. Uma das formas de se contornar esse problema, é a extração parcial ou total da zona Thermocline, que corresponde à remoção de parcela ou totalidade do HTF que está entre as zonas quente e fria. A extração do Thermocline visa manter não somente a eficiência de armazenamento do tanque como também da planta CSP.

A complexidade da operação de uma usina termossolar reside no fato de que a fonte de energia é a incidência solar, fonte que apresenta variações temporais e espaciais. Sem a utilização de sistemas de armazenamento intermediários, entre a fase de absorção da irradiação solar e a geração em conjuntos turbo-geradores, as plantas termossolares não apresentariam vantagens em relação aos painéis fotovoltaicos, e a complexidade de uma usina heliotérmica seria um grande impeditivo técnico-financeiro. Por outro lado, a utilização de armazenamento térmico em plantas termossolares apresenta diversas vantagens, viabilizando empreendimentos que utilizam a técnicas de concentração da irradiação solar. Tais vantagens são:

- a. Estabilização da geração ao longo dia, minimizando efeitos da oscilação da irradiação incidente;
- b. Armazenamento de energia na forma térmica, mesmo quando não há geração de energia elétrica pelo bloco de potência;
- c. Possibilidade de transferência de cargas entre horário fora-ponta e ponta, possuindo maior despachabilidade;
- d. Redução das oscilações térmicas no conjunto turbo-gerador em comparação à sistemas sem armazenamento, mantendo a temperatura de operação nominal ao longo do dia.

4.0 - METODOLOGIA

4.1 Campo Solar

Para o campo solar, discretizaram-se os módulos coletores solares em 48 módulos distribuídos em 3 circuitos de circulação de HTF. Cada circuito é composto por 16 unidades coletores, sendo 2 SCAs (*Solar Collector Array*) por loop, e cada SCA possui 8 SCEs (*Solar Collector Element*). Os módulos coletores solares foram modelados matematicamente através de equacionamentos empíricos, com base em experimentos realizados em unidades reais (3).

Além dos módulos coletores solares, o CS também foi dividido em trechos de tubulação, sendo os 3 componentes principais: tubulação de entrada do CS (entre tanque Thermocline e CS), tubulação intermediária (entre SCAs) e tubulação de saída do CS (entre CS e tanque Thermocline). Cada elemento foi discretização com base no projeto executivo da planta termossolar, evidenciando-se as componentes dimensionais e de perdas térmicas. A abordagem matemática seguiu o equacionamento apresentado por (3)

4.2 Tanque Thermocline

Para este estudo, utilizou-se o projeto da planta termossolar de UHE Porto Primavera (CESP) como base para o modelo físico matemático do sistema de absorção, armazenamento e geração. Este modelo utiliza como dados de entrada a irradiação solar incidente através de um banco de dados que possui dados solares de 15 em 15 minutos, além de informações ambientais como temperatura e velocidade do vento. Por se tratar de um CSP apenas a componente direta da irradiação é utilizada (DNI – *Direct Normal Irradiance*). Também foram utilizados os dados técnicos dos coletores solares, conjunto turbo-gerador, dentre outros; além das especificações técnicas do HTF em função da variação de temperatura e do projeto executivo da planta.

Para o tanque Thermocline, foram considerados:

- a. tanque único de armazenamento;
- b. temperatura do HTF quente de 350°C e do HTF frio de 240°C (quando em operação normal);
- c. adimensionalização do tanque Thermocline: dimensões, temperatura e tempo;
- d. modelo físico de conservação da quantidade de energia;
- e. discretização do modelo físico por volumes finitos.

Para obter-se o gradiente de temperatura do tanque Thermocline, utilizou-se da conservação da quantidade de energia, segundo a equação 1 (2):

$$(\rho C_p)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon (\rho C_p)_{liq} v_{liq} \frac{\partial T}{\partial z} = k_{ef} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - U_w a_w (T - T_\infty)$$

(1)

sendo:

ρ : densidade do meio [kg/m³]; C_p : Calor específico à pressão constante [J/(kg K)]; T : Temperatura [K]; t : tempo [s]; ε : proporção líquido/sólido [adimensional]; z : altura [m]; k : coeficiente de condução de calor [W/(m K)] U_w : coeficiente global de troca térmica na parede do tanque [W/(m² K)] a_w : área de troca térmica [m²] T_∞ : Temperatura ambiente [K].

O subscrito *ef* (efetivo, em relação à proporção líquido/sólido) e *liq* é apenas quanto ao líquido – HTF.

Pode-se desprezar a fração sólida do armazenamento da equação 1, pois o tanque só armazena HTF e as negligenciar as perdas pela parede, tem-se a equação 2:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon \rho C_p v \frac{\partial T}{\partial z} = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

(2)

Readequando a equação 2 em sua forma adimensional, obtém-se a equação 3 (1)(4):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t^i} + v^i \frac{\partial \phi}{\partial z^i} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^{i2}}$$

(3)

Discretizando-se o tanque Thermocline como um conjunto de elementos unidimensionais, cujo dimensão adimensionalizada é 1/N e considerando os subscritos (P para elemento de interesse, N para elemento ao norte e S para elemento ao sul), tem-se a equação 4 desenvolvida a partir de (4):

$$\underbrace{\left(\frac{\Delta z^i}{\Delta t^i} + \frac{2}{\Delta z^i} \right)}_{a_p} \phi_P = \underbrace{\left(\frac{1}{\Delta z^i} - \frac{v^i}{2} \right)}_{a_n} \phi_N + \underbrace{\left(\frac{1}{\Delta z^i} + \frac{v^i}{2} \right)}_{a_s} \phi_S + \underbrace{\frac{\Delta z^i}{\Delta t^i}}_{b_p} \phi_P^0$$

(4)

sendo:

Δz^i : altura do tanque [adimensional] ou razão da altura real pela total (z/L); Δt^i : tempo [adimensional] ou número de Fourier; v^i : velocidade [adimensional] ou número de Peclet; ϕ_P : temperatura no nó de interesse [adimensional]; ϕ_S : temperatura ao sul do nó de interesse [adimensional]; ϕ_N : temperatura ao norte do nó de interesse [adimensional]; ϕ_P^0 : temperatura no nó de interesse no passo de tempo anterior [adimensional]; a_p, a_n, a_s : coeficientes para TDMA [adimensionais]; b_p : termo fonte para TDMA [adimensional].

Resolvendo a equação 4 pelo método TDMA (*Tri-Diagonal Matrix Algorithm*), considerando os volumes finitos reais e fictícios, além das condições de contorno da temperatura dadas pelas temperaturas de entrada e saída

do HTF, nas porções superiores e inferiores do tanque, obtém-se as temperaturas nodais do tanque Thermocline, conforme Figura 3.

4.3 Power Block

O cálculo da conversão da energia térmica em energia disponível no eixo da turbina e da energia elétrica gerada no PB (bloco de potência), foi dado como uma correlação entre a energia térmica disponível no HTF quente cedido ao PB e a eficiência dos trocadores de calor e do conjunto turbo-gerador. Dessa forma, o modelamento matemático, assim como o CS foi dado como valor empírico em função de testes com o dispositivo real, conforme (3).

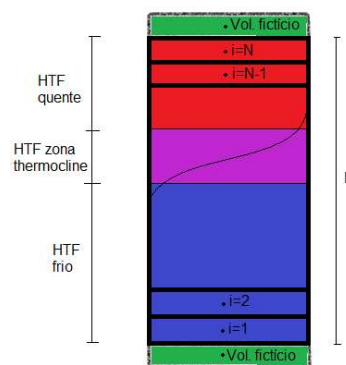


FIGURA 3 – Discretização do Tanque Thermocline em N volumes reais e N+2 volumes fictícios. Fonte: Lactec, 2019.

4.4 Modos de Operação

Para calcular a estimativa da eficiência global da planta termossolar com base em dados de entrada como DNI, velocidade do vento e temperatura ambiente em função das eficiências ópticas e térmicas de todos os equipamentos, elaborou-se uma lista dos principais modos de operação do CSP, sendo:

- a; Modo 01: Resfriamento – sem circulação de HTF no CS e sem geração no PB;
- b; Modo 02: Recirculação – circulação de HTF apenas no CS, sem carregar o tanque Thermocline (bypass) e sem geração no PB;
- c; Modo 03: Armazenamento – circulação de HTF no CS e carregamento do tanque Thermocline, porém sem geração no PB;
- d; Modo 04: Geração com Circulação – Circulação de HTF no CS, carregamento do tanque Thermocline e consumo de HTF no PB para geração de energia;
- e; Modo 05: Geração sem Circulação – Não há circulação de HTF no CS, com consequente consumo de HTF quente pelo PB para geração de energia.

As estratégias de operação levam em conta a combinação dos modos, acima citados, com base em critérios como: priorização de armazenamento de HTF, geração máxima de energia, evitar resfriamento do turbina a vapor durante os períodos em *stand-by*, e outras estratégias.

5.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na temperatura do tanque Thermocline, que decorre do carregamento e descarregamento de HTF através do CS e PB, respectivamente, pode-se obter, para cada estratégia de operação a eficiência máxima de operação do tanque e a eficiência global da planta termossolar, ao longo dos dias considerados para a simulação de geração da planta termossolar. Para as simulações realizadas, foram utilizados os valores médios da

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

incidência normal direta (DNI), velocidade do vento e temperatura ambiente dos últimos 14 anos, ou seja, cada dia corresponde a média dos últimos 14 anos para aquele dia em específico. A base de dados possui informações acumuladas de 15 em 15 minutos. Para uma melhor discretização da planta termossolar, foram feitas interpolações dos dados ambientais para períodos menores ou iguais a 60 segundos, facilitando a convergência matemática do algoritmo desenvolvido. Como as aproximações utilizadas são lineares, é necessário que o passo de tempo de simulação seja pequeno o suficiente para que não existam divergências na representação matemática do fenômeno físico que se quer simular, que é não-linear.

Como uma estratégia de operação, selecionou-se que a geração iniciaria através de alguns gatilhos de operação. Dentre eles se encontra a quantidade mínima de HTF quente armazenada no tanque imediatamente no período antes de entrar em operação. Os valores das quantidades mínimas escolhidas foram de: 10, 20, 30, 40, 50 e 60 toneladas de HTF quente (350°C). De forma geral, todas as estratégias de operação podem utilizar os 5 modos de operação previamente citados, contudo em ordens distintas. Para a estratégia aqui escolhida, escolheu-se pela preservação de HTF quente ao final do dia, de forma a manter a turbina em temperatura de operação – inclusive em *stand-by* – e que não seria feita a transferência fora-pico para pico, pois o objetivo é avaliar a eficiência de geração e a geração elétrica. Neste caso, a transferência de carga apenas introduziria uma perda de energia disponível no tanque Thermocline devido à difusividade térmica (lembrando-se que a perda de calor para o ambiente não foi considerada na discretização do tanque), durante o período de armazenagem de HTF quente.

A eficiência do tanque Thermocline é mostrada na Figura 4. A eficiência do tanque Thermocline é calculada como a razão entre o complementar do volume ocupado pelo Thermocline e o volume total de HTF armazenado no tanque à qualquer temperatura, i.e., se 20% do tanque é ocupado pelo Thermocline, a eficiência máxima naquele momento é de 80%.

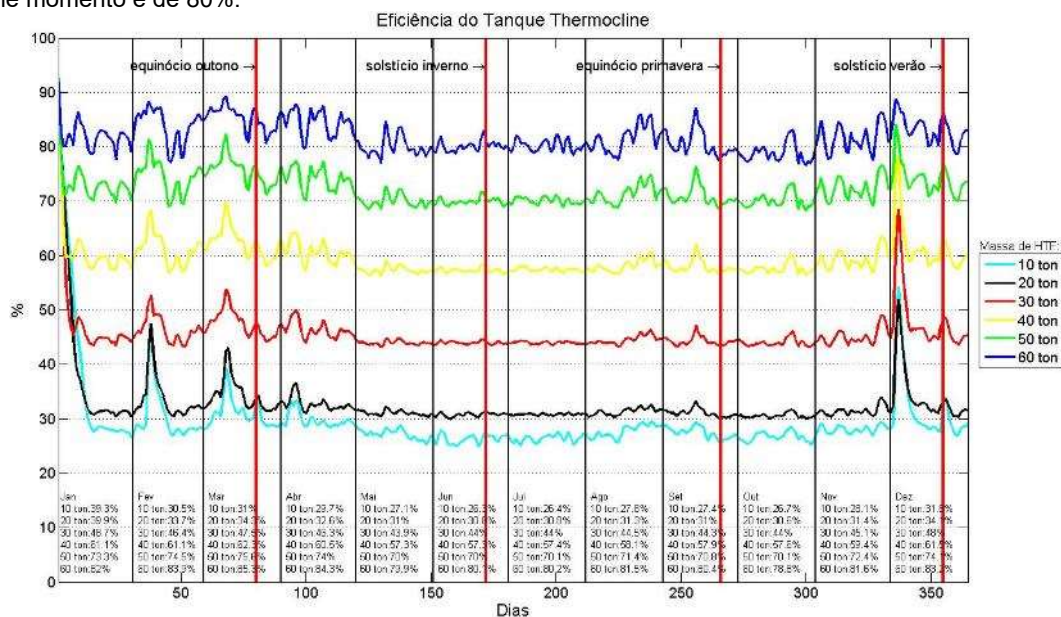


FIGURA 4 – Eficiência de armazenamento do tanque Thermocline. Fonte: Lactec, 2019.

A eficiência do tanque é tanto maior quanto menor a zona Thermocline, ou seja, quando se analisa a quantidade mínima de HTF quente antes do início de operação, quanto maior for essa quantidade, maior a extração da zona Thermocline, i.e., o fluido de trabalho existente na zona Thermocline é forçado a passar pelo CS e reaquecido à temperatura de 350°C. Para o caso de 60 toneladas de HTF quente antes do início da operação, onde há a extração quase que completa da zona Thermocline, há um aumento da eficiência para valores médios ao longo do ano que variam entre 79,9% e 85,3%. Enquanto que no outro espectro, quando há circulação de fluido de trabalho com 10 toneladas de armazenagem, a eficiência média mensal varia entre 26,3% e 39,3%, indicando a degradação térmica presente na zona Thermocline.

De forma contrária à eficiência no tanque Thermocline, há uma tendência de ocorrer uma leve melhora no sistema para quando se armazena menos HTF quente, isso porque evita-se a degradação térmica causada pela difusividade térmica durante o período de carregamento do tanque, conforme visualizado na Figura 5. Essa diferença representa, no melhor dos casos, 0,4 pontos percentuais de aumento da eficiência global. Em uma situação real, em que o período de partida e parada da turbina a vapor é de minutos até horas, para escalas de produção, a quantidade de vapor consumida neste processo é muito maior que o infimo ganho aparente na Figura 5 que representa uma condição ideal (tempo praticamente nulo de partida e parada).

A mesma consideração pode ser feita para a geração de energia elétrica – média mensal para a geração diária – mostrada na Figura 6. Há um ligeiro acréscimo da energia elétrica produzida quando o tempo de partida e parada é baixo o suficiente, o que não corresponde a uma situação real, em que o tempo de partida é significativo e o armazenamento de maior quantidade de HTF quente no tanque de armazenamento é compensado por uma geração contínua por períodos mais longos de tempo e pela maior estabilidade.

Também é possível verificar a variação sazonal da eficiência e conseqüentemente da energia elétrica gerada, para a melhor condição, a melhor média mensal para uma contabilização diária de geração foi de 10,5% de eficiência e 3,62 MWh para o mês de março e a pior média foi de 6,3% de eficiência e 1,78 MWh para junho. Apesar da diferença entre dias do ano, é possível que haja geração de energia ao longo de todo o ano, de forma estável, devido ao armazenamento térmico, não sendo necessária a partida à frio a cada dia, principalmente para os dias de inverno, em que a incidência solar é muito baixa. Nesta condição o aquecimento do HTF sem o armazenamento seria suficiente somente para dar partida na turbina, devido ao elevado tempo de aquecimento, aumento da rotação e sincronização com a rede (estimado em cerca de 2 horas e 15 minutos) em caso de partida a frio versus um período de 30 a 45 minutos quando mantido em *stand-by* e aquecido.

Outra condição simulada pelo algoritmo físico-matemático de geração de energia elétrica é a operação da turbina em condições de potência nominal a todo momento (maior consumo de vapor) ou operação em potência escalonada (consumo variável de vapor), em ambos os casos até o consumo total de HTF quente, exceto pela quantidade mínima de armazenamento. Na Figura 7 é mostrado um comparativo das eficiências entre a operação em potência nominal versus potência escalonada, mantendo todas as outras estratégias de operação idênticas. Há um aumento de 8,52% na eficiência quando se utiliza apenas a potência nominal da turbina, pois, a faixa de maior eficiência da turbina é quando está operando na faixa de potência nominal, e é menor para valores mais baixos de potência gerada.

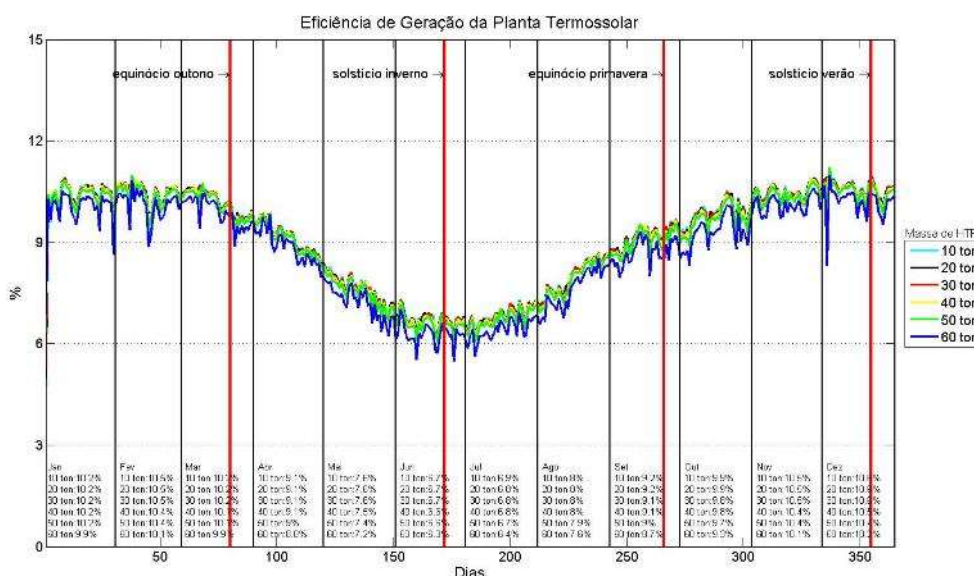


FIGURA 5 – Eficiência global de geração da planta termossolar de Ponto Primavera. Fonte: Lactec, 2019.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

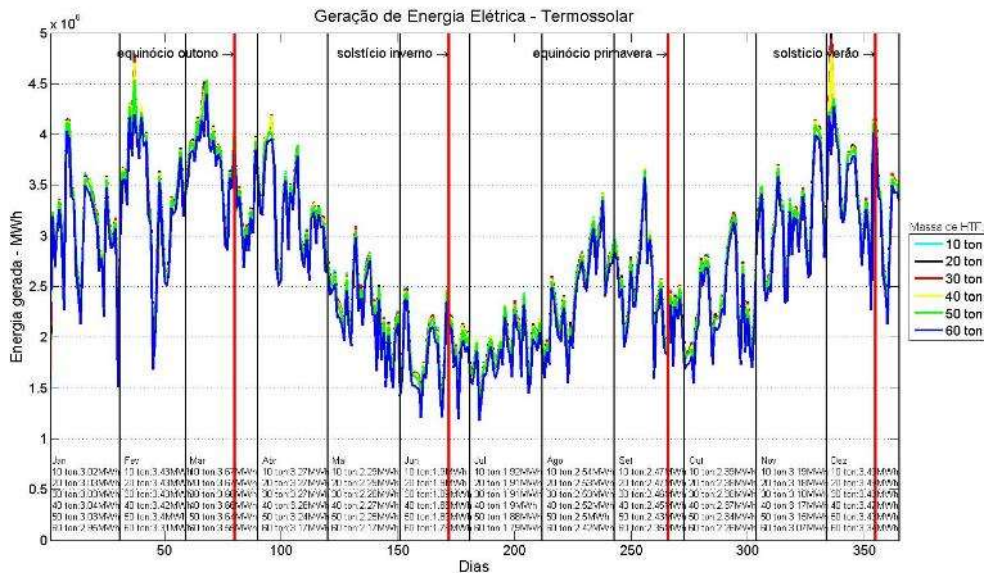


FIGURA 6 – Energia elétrica gerada (média diária) na planta termossolar de Ponto Primavera. Fonte: Lactec, 2019.

6.0 - CONCLUSÃO

A operação de plantas termossolares mostra-se, a partir dos resultados obtidos, dependente das condições de operação e das estratégias adotadas. Muitas vezes, até mesmo utilizando uma estratégia semelhante de operação, porém alterando o período de partida e parada de geração é possível incrementar ou decrementar a eficiência e conseqüentemente a energia elétrica gerada.

Considerando a variação de HTF quente armazenado antes do início da operação, apesar do aumento da eficiência, diminuto, quando não se carrega o tanque Thermocline em sua totalidade (em uma condição ideal de operação), essa vantagem é esgotada e suplantada quando considerada uma condição real, em que os tempos de partida e parada e as perdas energéticas ocorrem nesses períodos.

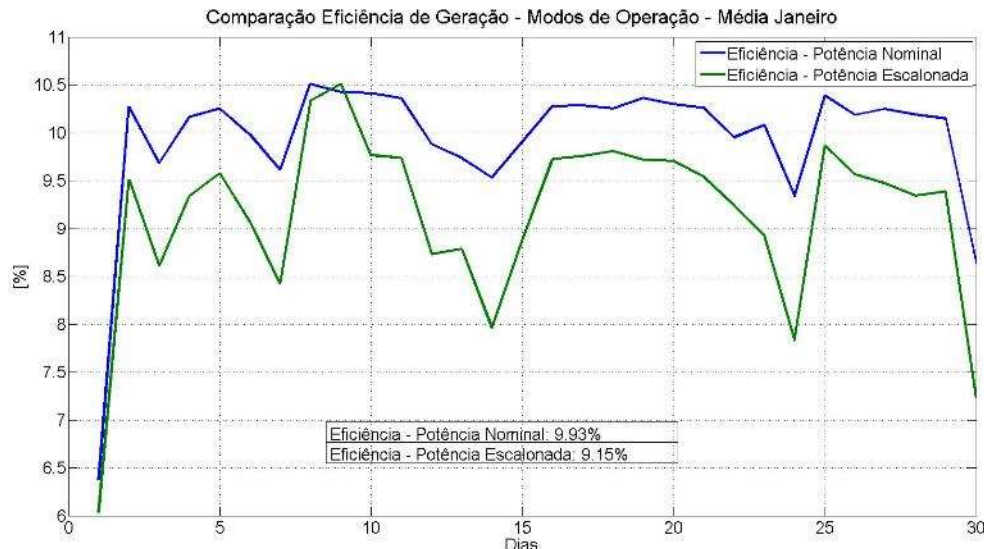


FIGURA 7 – Energia elétrica gerada (média diária) estimada para a planta termossolar do complexo da UHE Ponto Primavera. Fonte: Lactec, 2019.

Outro ponto a se considerar é a transferência de carga ao longo do dia – despachabilidade – que só possível quando há HTF quente suficiente armazenado no tanque. Isso ocorre, pois durante o armazenamento sem circulação no CS e no PB também ocorrem perdas energéticas. Dessa forma, a forma mais indicada de operação é o armazenamento completo do tanque sempre que possível ao início do dia, extraíndo a zona Thermocline, e aumentando a eficiência de armazenamento, despachabilidade e a segurança de operação em caso de irradiação solar insuficiente.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BAYÓN, R.; ROJAS, E. Analytical description of thermocline tank performance in dynamic processes and stand-by periods. *Energy Procedia*, v. 57, p. 617–626, 2014.
- (2) HOFFMANN, J. et al. A thermocline thermal energy storage system with filler materials for concentrated solar power plants : Experimental data and numerical model sensitivity to different experimental tank scales. v. 100, p. 753–761, 2016.
- (3) LLORENTE GARCÍA, I.; ÁLVAREZ, J. L.; BLANCO, D. Performance model for parabolic trough solar thermal power plants with thermal storage: Comparison to operating plant data. *Solar Energy*, v. 85, n. 10, p. 2443–2460, 2011.
- (4) PIZZOLATO, A. et al. CFD-based reduced model for the simulation of thermocline thermal energy storage systems. *Applied Thermal Engineering*, v. 76, p. 391–399, 2015.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rodrigo Canestraro Quadros

Graduação em Engenharia Mecânica – Curitiba/PR – Universidade Federal do Paraná – 2013

Mestrado em Engenharia Mecânica – Curitiba/PR – Universidade Federal do Paraná – 2018

Experiência em simulações numéricas e fenômenos de transporte, atualmente pesquisador pelo Instituto de



Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec).



Alessandro Presznuk Filho

Graduando em engenharia mecânica – Curitiba/PR – Universidade Federal do Paraná – 2019

Experiência em projeto mecânico, fenômenos de transporte, atualmente pesquisador pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec).



Kristie Kaminski Küster

Graduação em Engenharia Industrial Elétrica (ênfase Eletrotécnica) – Curitiba/PR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – 2007

Mestrado em Energias Renováveis – Alemanha – Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg – 2013

Experiência em soluções de integração à rede e sistemas isolados para energias renováveis, atualmente pesquisadora pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec).



Renato de Arruda Penteado Neto

Graduação em Engenharia Elétrica – Curitiba/PR – Universidade Federal do Paraná – 1977

Mestrado em Física – Curitiba/PR – Universidade Federal do Paraná – 1996

Doutorado em Engenharia de Materiais – Curitiba/PR – Universidade Federal do Paraná – 2005

Pós-Doutorado no Departamento de Hidráulica e Saneamento – Curitiba/PR – Universidade Federal do Paraná – 2019

Professor de programas de pós-graduação. Revisor de artigos da revista Fuel publicada pela Elsevier, do Journal of Automobile Engineering (ISSN 0954/4070) e da revista Energy and Fuels.



Luis Alexandre Catussi Paschoalotto

Graduação em Engenharia Mecânica – Ilha Solteira/SP – Universidade Estadual Paulista (UNESP) – 2010

Especialista em Gerenciamento da Manutenção – São Paulo/SP – FEI – 2012

Mestrando em Desenvolvimento de Tecnologia – Curitiba/PR – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – 2019.

Gerente de Engenharia Eletromecânica da CESP, com experiência em operação e manutenção de usinas hidrelétricas, implantação de usinas fotovoltaicas e é gerente do projeto de P&D Termosolar da CESP.



Ana Paula Oening

Graduação em Matemática Industrial – Curitiba/PR – Universidade Federal do Paraná – 2004

Mestrado no programa Métodos Numéricos para Engenharia (Otimização não-linear) – Curitiba/PR –



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4685
GES/13

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Universidade Federal do Paraná – 2006

Doutorado no programa Métodos Numéricos para Engenharia (Previsão de Carga) – Curitiba/PR – Universidade Federal do Paraná – 2014

Experiência em Sistemas Elétricos, planejamento e Operação de Sistemas de energia elétrica, mercado e comercialização de energia, análise de viabilidade econômica, pesquisa operacional, otimização, inteligência computacional e previsão de séries temporais. Atualmente professora da UniBrasil e Lactec; e pesquisadora do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec).