

MODELO TRANSIENTE PARA ARMAZENAMENTO TÉRMICO EM SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA

Arthur Kleyton Azevedo de Araújo – arthurkleyton@gmail.com

Gabriel Ivan Medina Tapia – gabriel.ivan.medina@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Mecânica

João Gutemberg Barbosa Farias Filho – joao.gutemberg.farias@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Mecatrônica

Resumo. A energia solar é uma fonte limpa e inesgotável de energia, entretanto o fator de capacidade das usinas ainda é baixo se comparada a outras fontes, tais como hidro e nuclear. Dentre as renováveis, a energia solar térmica é capaz de armazenar a energia excedente em tanques de armazenamento térmico e então utilizar esta energia em períodos de nebulosidade ou após o crepúsculo, quando a energia solar incidente não é suficiente para gerar potência. Este trabalho busca simular um sistema de armazenamento térmico em sistemas de energia solar concentrada por calor sensível de dois tanques utilizando sal derretido como fluido de transferência de calor, o qual é o mais utilizado em usinas solares térmicas. A análise consiste em uma simulação transiente dos mecanismos de transferência de calor em tanques de armazenamento térmico totalmente carregado. A simulação é realizada para as condições climáticas na região do semiárido brasileiro (Petrolina -PE). Os resultados foram comparados a situações reais disponíveis na literatura.

Palavras-chave: Armazenamento de energia térmica, energia solar, dois tanques.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação das nações acerca da poluição causada por emissões de gases do efeito estufa tem despertado o interesse em fontes alternativas de energia. Acidentes recentes em usinas nucleares, como o de Fukushima, Japão, tem levado aos países que possuem esta fonte como principal meio de geração de energia a buscar novas fontes com menores efeitos ao meio ambiente.

As energias renováveis vêm ganhando cada vez mais espaço e se tornando competitiva no mercado. Entretanto, o fator de capacidade dessas usinas ainda é baixo quando comparada a outras fontes não renováveis, como termoeletricas a gás e a carvão mineral. Dentre as energias renováveis, a energia termo solar, que utiliza da energia térmica proveniente do sol para geração de potência, possui um grande potencial para o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia térmica. Desse modo, pode-se gerar energia elétrica em períodos de nebulosidade e após o crepúsculo, alternativa que não está presente nos parques eólicos (com a falta do vento) e nos painéis fotovoltaicos (na falta de luz solar).

Os chamados Sistemas de Armazenamento Térmico (TES do inglês *Thermal Energy Storage*) consistem em armazenar energia térmica por três meios distintos: Por calor sensível, onde não há mudança de fase; Por calor latente, onde há a mudança de fase; E por reações químicas, onde o calor é utilizado para conduzir reações químicas. Entre as usinas que estão em operação, o meio de armazenamento térmico mais utilizado e aceito são os por calor sensível direto de dois tanques (Zaversky *et al.* 2013). Esse sistema consiste no aquecimento de um fluido de transferência de calor (HTF do inglês *Heat Transfer Fluid*) e, por conseguinte armazenado no tanque quente, onde em períodos de nebulosidade ou após o crepúsculo a energia é utilizada em um trocador de calor para gerar o vapor para as turbinas, em seguida o HTF vai para um tanque frio e retorna ao receptor de calor. A Fig. 1 esboça um esquema de TES por calor sensível direto de dois tanques.

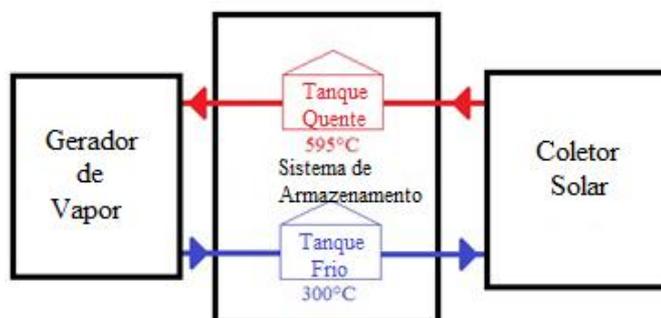


Figura 1 - Esboço de um TES por calor sensível direto dois tanques.

Este tipo de TES pode chegar a uma capacidade de armazenamento de 15h (Gemasa, Sevilla – Spain), podendo fornecer energia 24h ao dia. Em termos gerais, a energia solar é uma fonte renovável inesgotável com grande potencial para aproveitamento energético. Este artigo busca fornecer uma ferramenta de solução rápida e confiável para simulações de tanques de armazenamento térmico, utilizando o método de volumes finitos aliado com os mecanismos de transferência de calor para alcançar esse objetivo.

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento de novas tecnologias depende da compreensão física desses sistemas. Para tanto, este trabalho busca de forma simples e rápida, analisar as perdas térmicas de um tanque de armazenamento térmico. O sistema foi analisado considerando o período de um dia de armazenamento, onde foi considerado regime permanente para a média mensal de radiação solar e correntes de vento. Dessa forma tem-se o decaimento da temperatura do HTF ao final de um dia de armazenamento.

2.1 Propriedades do tanque

O sistema analisado consiste em temperaturas de operação de 560 °C para o tanque quente e 295 °C para o tanque frio. De acordo com Kuravi *et al* (2013), em aplicações com temperaturas inferiores a 400 °C o uso de aço carbono é aceitável, e para aplicações com temperaturas superiores deve-se utilizar aços inoxidáveis para componentes do tanque. O material de isolamento deve ser selecionado com base nos ranges de temperatura de operação.

Zaversky *et al* (2013) estabelece que a condutividade térmica é o fator governante da perda de calor dos tanques. O material isolante utilizado nas paredes do tanque é composto por lã mineral, espuma de vidro e placas de silicato de cálcio e para o teto do tanque é composto por placas de silicato, visto que a relação entre a condutividade térmica e a temperatura são conhecidas (Zaversky *et al*, 2013) e é dada pela Eq. (1) e Eq. (2) para as paredes e teto do tanque, respectivamente.

$$k = k_0 + k_1 \cdot (T - 273.15) \quad (1)$$

$$k = 0,0674 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot T + 6 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 9 \cdot 10^{-12} \cdot T^3 \quad (2)$$

k – Condutividade Térmica [W/mK];

k_0 – Coeficiente de correlação de condutividade térmica [W/mK]

k_1 – Coeficiente de correlação de condutividade térmica [W/mK]

T – Temperatura de operação [°C]

A superfície interna e externa do material isolante é protegida por camadas de metal, entretanto estas não serão modeladas visto que a inércia e resistência térmica desses materiais podem ser desprezadas (Zaversky *et al*, 2013). Valores de k_0 e k_1 para os materiais de isolamento são 0,037 W/(mK) e $2 \cdot 10^{-4}$ W/(mK), respectivamente.

2.2 Propriedades do fluido de troca de calor

O HTF deve ser determinado a fim de ser compatível com o tipo de armazenamento e capaz de operar entre o intervalo de temperatura. Para plantas solares que utilizam o TES dois tanques calor sensível os HTF mais utilizados são os sais derretidos (Kuravi *et al*, 2013). Para este trabalho, utilizou-se o Nitrato de Sódio derretido (60% NaNO₃, 40% KNO₃), conhecido também como sal solar, o qual é bastante utilizado em usinas de concentração solar por operar em altas temperaturas (290 °C a 565 °C). Além de que, dados como condutividade térmica, difusividade térmica, entre outros estarem facilmente disponíveis em Kreith *et al* (2011).

2.3 Modelagem do tanque

O Tanque foi modelado seguindo um esquema semelhante ao proposto por Zaversky *et al* (2013), o qual foi considerado os mecanismos de transferência de calor. A Fig. 2 esboça o modelo proposto. O sal solar troca calor por meio da convecção com as paredes internas do tanque, com o fundo do tanque e com gás atmosférico do tanque, a radiação emitida pela superfície da lamina de sal com as paredes não molhadas do tanque também foram consideradas na análise. O gás atmosférico por sua vez troca calor por convecção com as paredes não molhadas e com o teto do tanque. Por fim, foi considerada a condução a partir da superfície interna para a externa do tanque (parede molhada, parede não molhada e teto) e a convecção com o meio. A radiação emitida e a incidente solar também foram analisadas.

A transferência de calor entre o sal derretido e as paredes do tanque, bem como o fundo do tanque foram modeladas como convecção natural. Movimentos relacionados a bombas foram considerados desprezíveis nesta análise. As correlações para o número adimensional de convecção (número de Nusselt, Nu) foram obtidas em Kreith *et al* (2011). Para a convecção natural entre o sal derretido e a parede utilizou-se a Eq. (3) para intervalos de Número de

Raileigh (Ra) de 10 a 10^8 , e Eq (4) para número de Grashof (Gr) superior a 10^9 , correlações essas, aplicadas a fluido quente em contato com superfície vertical fria.

$$Nu = 0,68Pr^{1/2} \cdot \frac{Gr^{1/4}}{(0,952 + Pr)^{1/4}} \quad (3)$$

Onde Pr é o Número de Prandtl.

$$Nu = 0,68Ra^{1/3} \quad (4)$$

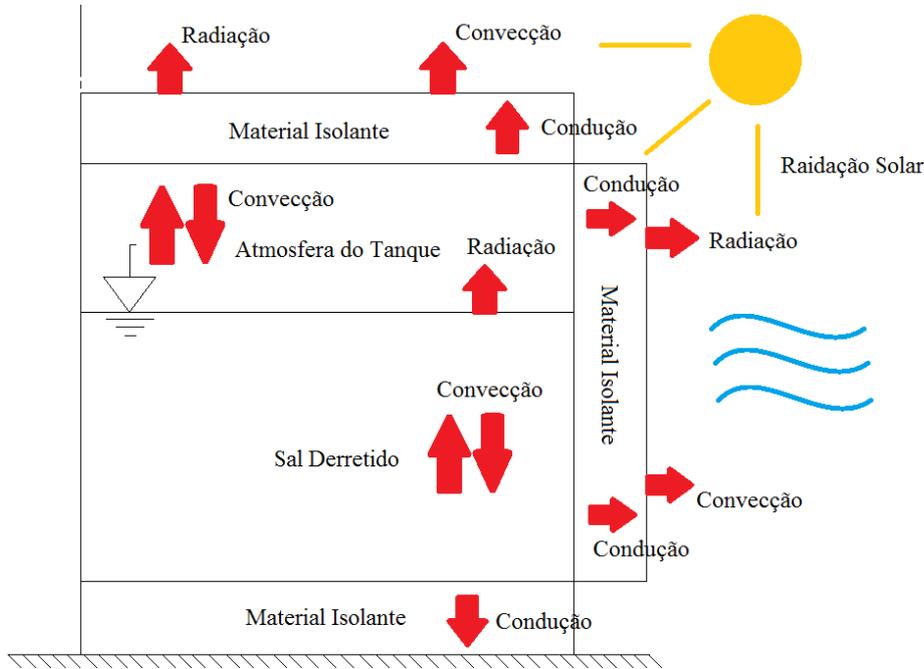


Figura 2 - Esquema ilustrativo de um tanque de armazenamento térmico.

A convecção natural entre o sal derretido e o fundo do tanque foi calculada aplicando a correlação, Eq. (5), para fluido quente em contato com placa inferior fria para intervalos de número de Raileigh entre 10^5 a 10^{10} .

$$Nu = 0,27Ra^{1/4} \quad (5)$$

O mecanismo de transferência de calor entre o sal derretido e o gás foi modelado como uma fina placa de gás em contato inferior com o liquido quente (Zaversky *et al*, 2013). A Eq. (6) representa a correlação do número de Nusselt para este mecanismo para intervalos de número de Ra entre 10^5 a 10^7 e a Eq. (7) para intervalos entre 10^7 a 10^{10} .

$$Nu = 0,27Ra^{1/4} \quad (6)$$

$$Nu = 0,15Ra^{1/3} \quad (7)$$

Analogamente, essas correlações podem ser aplicadas a atmosfera do tanque em relação às paredes não molhadas.

A atmosfera do tanque foi modelada como uma cavidade, onde foi realizado um balanço de energia radiada e irradiada foi realizado. As correlações para o calculo dos fatores de forma da superfície do sal e o teto do tanque foi a mesma utilizada para dois discos concêntricos de mesmo diâmetro, dada pela Eq. (8). Para o fator de forma entre a superfície do sal e as paredes do tanque foi utilizado a relação entre os fatores de forma, Eq. (9). Essas correlações foram obtidas em Çengel e Ghajar, 2012.

$$F_{1 \rightarrow 2} = 1 + \frac{1 - \sqrt{4R^2 + 1}}{2R^2} \quad (8)$$

$$F_{1 \rightarrow 3} = 1 - F_{1 \rightarrow 2} - F_{1 \rightarrow 1} \quad (9)$$

Onde $F_{1 \rightarrow 2}$ é o fator de forma entre a superfície do sal e o teto do tanque, $F_{1 \rightarrow 3}$ é o fator de forma entre a superfície do sal e as paredes do tanque e $F_{1 \rightarrow 1}$ é o fator de forma entre a superfície do sal e ela mesmo, que neste caso é nulo.

Para a superfície externa foi considerada uma convecção mista (natural e forçada) e a radiação emitida e recebida pela superfície. A convecção natural foi calculada como uma placa quente, devido ao seu grande diâmetro, em um meio frio, Eq. (3) e a convecção forçada como um cilindro quente em contato com um fluxo de ar frio, Eq. (10). A equação (11) modela o comportamento misto, onde n para este caso é três, Çengel e Ghajar, 2012.

$$\begin{aligned}
 Nu &= 0,989Re^{0,330} Pr^{1/3} && \text{for } 0.4 < Re < 4 \\
 Nu &= 0,911Re^{0,385} Pr^{1/3} && \text{for } 4 < Re < 40 \\
 Nu &= 0,683Re^{0,466} Pr^{1/3} && \text{for } 40 < Re < 4000 \\
 Nu &= 0,193Re^{0,618} Pr^{1/3} && \text{for } 4000 < Re < 40000 \\
 Nu &= 0,027Re^{0,805} Pr^{1/3} && \text{for } 40000 < Re < 400000
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

$$Nu_{comb} = (Nu^n_{forçada} + Nu^n_{natural})^{1/n}
 \tag{11}$$

A radiação emitida pela superfície externa do tanque foi modelada pela seguinte Eq. (12).

$$Q_{rad} = \epsilon_{wall} \cdot A \cdot T_s^4
 \tag{12}$$

Onde ϵ_{wall} é a emissividade da parede externa do tanque, 'A' é a área da superfície externa do tanque e T_s é a temperatura da superfície externa.

A radiação solar incidente no tanque, assim como a temperatura ambiente e a velocidade do vento foram obtidas através do sistema de aquisições de dados do laboratório de energia solar da universidade federal do rio grande do norte. Para cada intervalo de meia hora esses valores foram medidos. A Fig. 3 mostra a variação desses parâmetros pelo tempo.

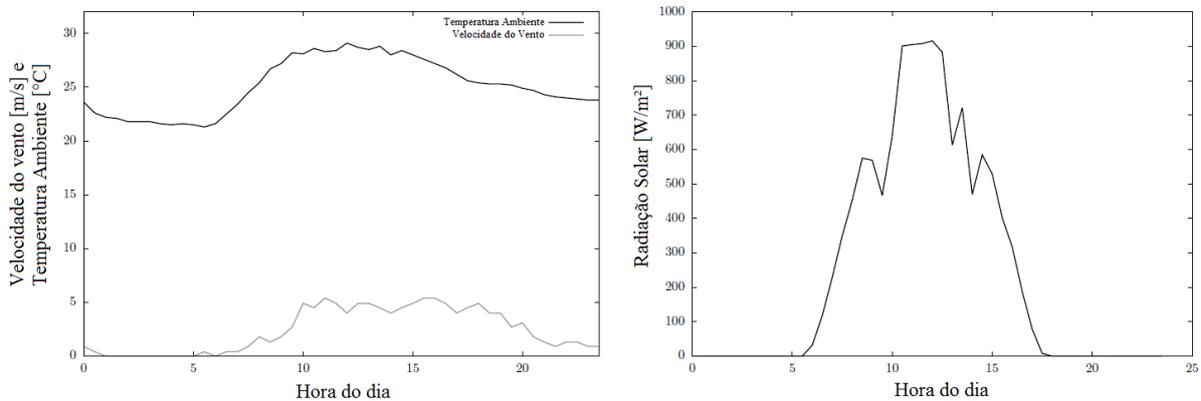


Figura 3 - Temperatura ambiente, velocidade do vento e radiação solar.

A condução entre a parede interna e externa do tanque foi modelada utilizando o método dos volumes finitos (Fig. 4), na qual a espessura da parede foi dividida em pequenos volume. Inicialmente foi considerada uma parede totalmente isotérmica e com o tempo, a parede externa perde calor para o ambiente, surgindo um gradiente de temperatura. As condições de contorno foram o fluxo de calor do sal para as paredes internas do tanque e o fluxo de calor para o ambiente externo ao tanque. Também foi considerado o armazenamento de calor pelos volumes finitos.

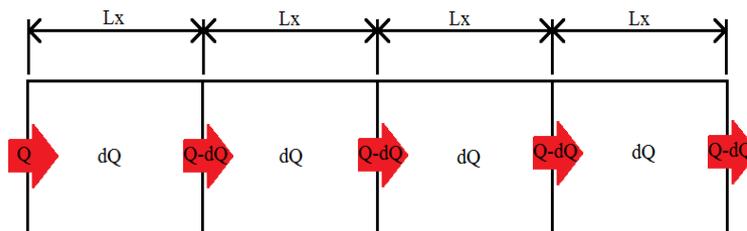


Figura 4 - Esquema do método de volumes finitos.

Foi selecionado um dia característico do mês de agosto para realizar a simulação. Em posse desses dados, foi utilizada a linguagem de programação C++ para calcular tais efeitos. O procedimento computacional consiste na aplicação do método de volumes finitos nas paredes, teto e fundo do tanque. Cada um desses foi dividido em pequenos elementos (130 unidades) resultando em um sistema de Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs). Esse sistema foi resolvido utilizando uma implementação do método Runge-Kutta de quarta ordem.

A temperatura do sal solar foi determinada como 595°C para o tanque quente. O sistema foi considerado isotérmico para as condições iniciais. Como dito anteriormente, a temperatura ambiente, velocidade do vento e radiação solar foram utilizadas como condições de contorno. Por fim, a queda de temperatura e a perda de calor do sal solar pode ser determinada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido a condição inicial da parede isotérmica, os dois primeiros dias não foram considerados na análise, visto que eles representam apenas a perda de calor sofrida pela parede do tanque para o meio ambiente. A partir do terceiro dia o sal solar apresenta queda na temperatura. A Fig. 5 e Fig. 6 mostram os gráficos de queda de temperatura e perda de calor deste trabalho e de Zaversky et al., 2013, versus tempo.

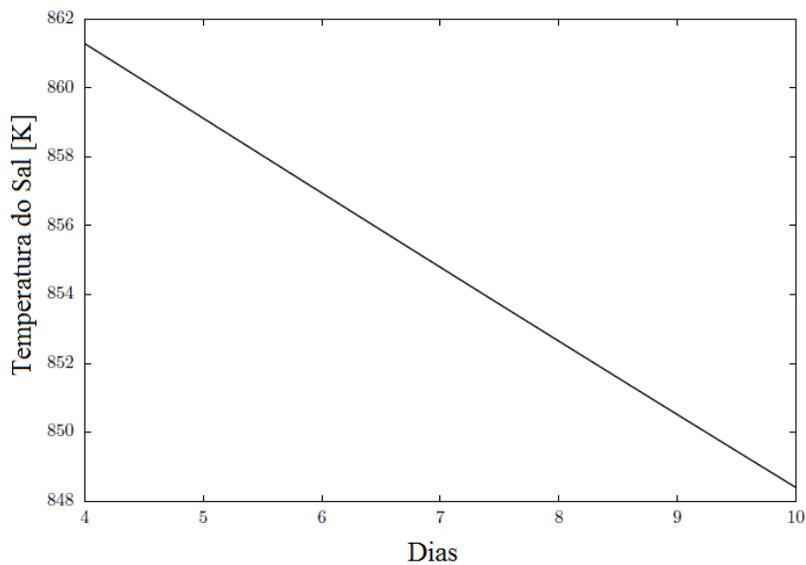


Figura 5 - Queda da temperatura.

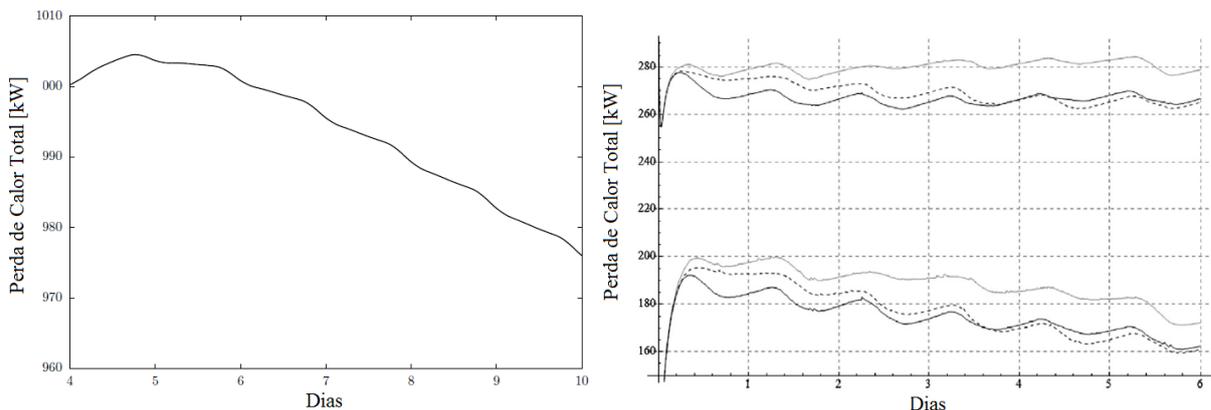


Figure 6 - Perda de calor A. Araújo, G. Medina T. e J. Farias Filho (esquerda) e Zaversky et al., 2013 (direita).

Durante um dia, a queda de temperatura é cerca de 2 K/dia para o tanque quente. Zaversky et al., 2013, apresenta resultado similar, com quedas de temperatura em torno de 1,1 K/dia para o tanque quente totalmente carregado e 5,4K/dia par ao tanque frio. Diferentemente de Zaversky et al., 2013, o tanque proposto por este trabalho apresentou uma perda de calor em torno de 1MW, entretanto esta perda decresce rapidamente, visto que a temperatura da parede externa do tanque atinge valores próximos a temperatura ambiente. A grande diferença entre os dois trabalhos se da pela abordagem diferente, bem como os métodos de cálculos dos coeficientes de transferência de calor e das dimensões do tanque.

4. CONCLUSÕES

Tanques de armazenamento térmico apresentam perdas de calor aceitáveis para suas aplicações, visto que são apenas usados quando a energia solar não consegue suprir a demanda para geração de energia elétrica. Portanto, uma queda de temperatura em torno de 2K/dia é satisfatória.

O armazenamento térmico é um dos pontos fortes da energia solar térmica. A compreensão dos mecanismos de transferência de calor é de fundamental importância para o desenvolvimento de novas tecnologias de armazenamento térmico. O uso de ferramentas confiáveis que permitam o estudo e análise de tais sistemas contribui para um todo. Este trabalho alcançou resultados satisfatórios para perda de calor em tanques de armazenamento térmico por calor sensível.

Análises mais profundas dos mecanismos de transferência de calor e métodos eficientes podem ser realizadas em busca de melhores análises. O projeto e seleção de materiais para tanques de armazenamento térmico podem ser incluídos para análises comparativas. As condições iniciais e de contorno devem ser revisadas em busca de resultados confiáveis em comparação as condições encontradas na prática.

REFERÊNCIAS

- Duffie, A.J. and Beckman, W.A., 2013. Solar engineering of thermal processes. Wiley, USA, 4th edition.
- Çengel, Y.A. and Ghajar, A.J., 2012. Transferência de calor e massa Uma abordagem prática. McgrawHill, Porto Alegre, 4th edition.
- Kreith, F., Manglik, R.M. and Bohn, M.S., 2011. Principles of heat transfer. Cengage Learning, USA, 7th edition.
- Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, D.Y., Rahman, M.M. and Stefanakos, E.K., 2013. “Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants”. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 39, pp. 285–319.
- Zaversky, F., Barberena, J.G., Sánchez, M. and Astrain, D., 2013. “Transient molten salt two-tank thermal storage modeling for csp performance simulations”. Solar Energy, Vol. 93, pp. 294–311.
- Zaversky, F., García, M.M.R., Barberena, J.G., Sánchez, M. and Astrain, D., 2014a. “Transient behavior of an active indirect two-tank thermal energy storage system during changes in operating mode – an application of an experimentally validated numerical model”. Energy Procedia, Vol. 49, pp. 1078–1087.
- Zaversky, F., Sánchez, M. and Astrain, D., 2014b. “Object-oriented modeling for the transient response simulation of multi-pass shell-and-tube heat exchangers as applied in active indirect thermal energy storage systems for concentrated solar power”. Energy, Vol. 65, pp. 647–664.

TRANSIENT MODEL FOR THERMAL STORAGE IN CONCENTRATED SOLAR ENERGY SYSTEMS

Abstract. *Solar energy is an inexhaustible clean source of energy, however the capacity factor of these plants are low if compared to other sources, such as hydro and nuclear. Among the renewables, the solar thermal is able to retain the excess of energy in thermal storage systems and thus use this energy in periods of cloudiness and after dusk, when the incidence of sunlights are not enough to generate power. This work attempts to simulate a two-tanks sensible heat thermal storage system using the molten salt as heat transfer fluid, which is the most used in solar power plants. The analysis consists of a transient simulation of the heat exchange mechanisms in the storage tanks fully charged and discharged. The simulation is performed for the climatic data of the Brazilian semi-arid region (Petrolina - PE) and the heat loss results are compared to actual situations available in the literature.*

Key words: *Thermal energy storage, solar power energy, two tanks storage system*