

Uso da energia solar como fonte alternativa para o aquecimento de utilidades: simulação e controle

Auxiliary solar heating system: simulation and control

Uso de la energía solar como fuente alternativa para sistemas de calefacción: simulación y control

Recebido: 05/02/2020 | Revisado: 14/02/2020 | Aceito: 20/02/2020 | Publicado: 10/03/2020

Silas Tavares Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2629-9891>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: silas.tavares.silva@hotmail.com

Nádia Guimarães Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3142-5875>

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil

E-mail: nadia.sousa@uftm.edu.br

Resumo

A energia solar se tornou uma das formas de energia alternativa mais utilizada, por ser uma fonte renovável e não poluente. Sendo assim, sistemas de aquecimento solar vêm sendo cada vez mais empregados nos setores residenciais e industriais. Todavia, em períodos com baixa ou nenhuma luminosidade solar, a sua eficiência fica prejudicada. Partindo desse pressuposto, o presente trabalho propõe a modelagem matemática de um sistema auxiliar de aquecimento de utilidades industriais, empregando a energia solar como fonte alternativa. Sendo avaliados três tipos de configurações para o sistema de aquecimento: sistema I - sem coletor solar, sistema II - com coletor solar funcionando 24 h por dia, e sistema III - sistema híbrido, no qual coletor solar é acionado apenas durante o período em que há incidência de radiação solar (10h – 17h). Para o melhor aproveitamento das fontes de energia disponíveis (renovável e não renovável) propõe-se a implementação de controladores do tipo *on/off* e do tipo PI, nas configurações estudadas. O modelo matemático proposto foi simulado usando o *software* livre Scilab[®]. Analisando os resultados obtidos pela simulação, o sistema híbrido apresentou maior economia de energia, cerca de 8%, quando comparado ao sistema I. Para os casos utilizando controladores, quando comparados ao sistema sem controlador, aquele que se mostrou mais

adequado foi o com controlador PI implementado ao sistema híbrido, apresentando uma economia de 60W de energia, por dia de operação.

Palavras-chave: Controlador *on/off*; Controlador PI; Energia Solar; Modelagem.

Abstract

Solar energy has become the most used forms of alternative energy, being a renewable and non-polluting source. As such, solar heating systems have been increasingly used in the residential and industrial sectors. However, in periods with low or no solar luminosity, its efficiency is impaired. Based on this assumption, this work proposes the mathematical modeling of an auxiliary heating system, using solar energy as an alternative source. Three types of configurations are evaluated for the heating system: system I - without solar collector, system II - with solar collector running 24 hours a day, and system III - hybrid system, in which solar collector is activated only during the period in which there is incidence of solar radiation (10am - 5pm). It is proposed the implementation of *on/off* and PI controllers, in the configurations studied. The results are obtained from the simulation of the mathematical model using the free software Scilab®. The results show that the hybrid system is saving more energy, about 8% of energy when compared to the system I. The PI control is best suited for this application, especially when it is implemented with hybrid system, saving of 60W of energy per day of operation.

Keywords: *on/off* Control; PI Control; Solar Energy; Modelling.

Resumen

La energía solar se ha convertido en una de las formas más utilizadas de energía alternativa, ya que es una fuente renovable y no contaminante. Por lo tanto, los sistemas de calefacción solar se utilizan cada vez más en los sectores residencial e industrial. Sin embargo, en períodos con poca o ninguna luz solar, su eficiencia se ve afectada. En base a esta suposición, el presente trabajo propone el modelado matemático de un sistema auxiliar de calefacción industrial, utilizando la energía solar como fuente alternativa. Se evalúan tres tipos de configuraciones para el sistema de calefacción: sistema I - sin colector solar, sistema II - con colector solar que funciona las 24 horas del día, y sistema III - sistema híbrido, en el que el colector solar se activa solo durante el período en que Hay incidencia de radiación solar (10 am - 5 pm). Para el mejor uso de las fuentes de energía disponibles (renovables y no renovables), se propone implementar controladores *on/off* y tipo PI, en las configuraciones estudiadas. Los resultados se obtuvieron simulando el modelo matemático usando el *software*

libre Scilab®. El sistema híbrido mostró un mayor ahorro de energía, alrededor del 8%, en comparación con el sistema I. Para los casos que utilizan controladores, en comparación con el sistema sin controlador, el que era más adecuado era el que tenía un controlador PI, con el sistema híbrido. En este caso, se obtuvieron ahorros de 60W de energía per día de operación.

Palabras clave: Controlador *on/off*; Controlador PI; Energía solar; Modelado.

1. Introdução

Durante muitos anos, o crescimento econômico foi indiferente à natureza. Com a escassez de recursos naturais não renováveis esse processo está passando por uma avaliação e reavaliação buscando um equilíbrio entre as dimensões social, econômica e ambiental. Entre os vários conceitos adotados atualmente, o desenvolvimento sustentável é aquele que atende as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades. (Pereira, et al., 2017)

Uma das opções para o desenvolvimento sustentável está na inovação e desenvolvimento de novas tecnologias que são capazes de aproveitar e converter recursos energéticos naturais disponíveis de forma abundante (Pereira, et al, 2017). Diante desse pressuposto, a utilização da energia solar como fonte alternativa de energia, ganha cada vez mais força, pois além de não poluir, é economicamente viável, por ser mais barata que fontes tradicionais (Tavares & Sousa, 2018).

A energia solar é necessária e de extrema importância para o desenvolvimento de todos os ciclos da natureza. Os primeiros estudos, em relação à utilização da energia solar, foram feitos através da termodinâmica, para o aquecimento de fluidos gasosos e líquidos, e posteriormente, iniciou os estudos em relação ao efeito fotoelétrico (Gnoatto, et al., 2008).

O Brasil é um país que possui valores de irradiação solar em sua superfície bem uniformes, apesar de suas diferenças climáticas e extensão. A radiação média diária mais alta, 6,5kWh/m² é registrada na região Nordeste, e a menor radiação, 4,25kWh/m² é registrada na região Sul do país (Martins, et al., 2012). A média da radiação solar no Brasil, durante o ano, é bem maior que a média na maioria dos países da União Europeia, em média 3,2 kWh/m², onde a utilização da energia solar é bem difundida (Cardoso & Campos, 2017).

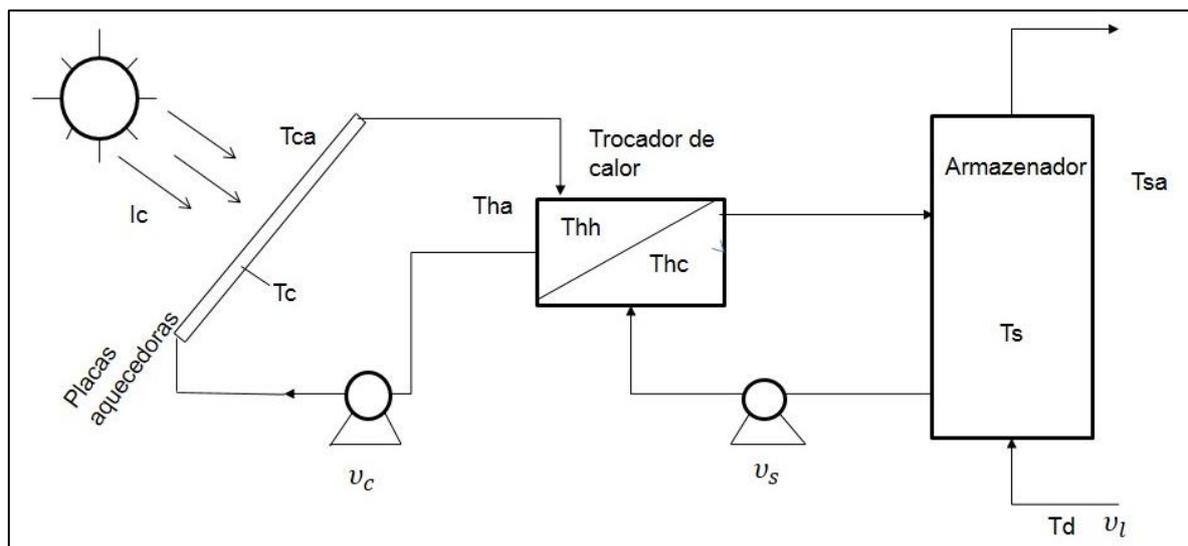
A energia solar pode ser aproveitada na forma de geração direta de energia elétrica, e na forma de calor, transferindo a energia para um determinado fluido. O aproveitamento do calor da radiação solar, para o aquecimento de utilidades, é uma alternativa atraente quando se fala em reduzir o impacto na demanda energética do segmento industrial. Para esses casos,

utilizam-se coletores solares. Os coletores solares mais comumente usados são os planos, tanto para fins residenciais como para fins industriais (Silva, 2015).

Segundo Fonseca, et al., (2018), os coletores planos são constituídos de uma caixa retangular, devidamente isolada termicamente e fechada por revestimentos de poliuretano ou lã de vidro. O funcionamento tem como base o efeito estufa formado dentro do coletor solar. A radiação solar incide sobre o vidro, que compões o coletor, e penetra, transferindo o calor e aquecendo o fluido que circula no interior dos tubos que formam o sistema. O fluido aquecido é, posteriormente, transferido para o tanque de armazenamento térmico.

Um sistema de aquecimento solar básico, como mostrado na Figura 1, é constituído, além da placa coletora solar, de um trocador de calor e um armazenador ou *boiler*.

Figura 1: Esquema de um sistema de aquecimento solar.



Fonte: Kicsiny, et al., 2014

O coletor solar é a parte responsável por converter energia solar em calor, e transferir o calor para o fluido de aquecimento (T_c). No trocador de calor, ocorre a troca térmica entre o fluido frio (T_{hc}) e o fluido devidamente aquecido pelo coletor (T_{hh}). O *boiler* é o tanque termicamente isolado responsável por armazenar a água aquecida (T_s) durante o dia, para garantir o suprimento noturno ou em dias chuvosos com água quente (Oliveira, et al., 2009). As variáveis v_c , v_s e v_l são as vazões de alimentação no coletor solar, trocador de calor e tanque de armazenamento, respectivamente. I_c é a irradiação solar global na superfície do coletor, T_d é a temperatura do fluido a ser aquecido e T_{ca} , T_{ha} e T_{sa} são as temperaturas ambiente do coletor solar, trocador de calor e tanque de aquecimento, respectivamente.

Adicionado a estes itens têm-se as tubulações e conexões, e pode existir uma fonte auxiliar de energia, como por exemplo, energia elétrica, esta tem como função manter a temperatura do fluido no valor desejado, principalmente em períodos com baixa ou ausência de luz solar (Oliveira, et al., 2009).

A avaliação da substituição da atual forma de utilização de energia para formas mais sustentáveis, como o tipo de coletor solar citado anteriormente, vem sendo estudada devido ao crescimento da demanda energética. Podem ser citados alguns estudos nessa área como o trabalho de Mekhilef, et al., (2011) que propuseram a implementação da energia fotovoltaica e aquecimento solar nas indústrias, a fim de diminuir a emissão de gases do efeito estufa. Utilizando o *software* Matlab, Medeiros, et al., (2013) avaliaram a otimização de um sistema misto de aquecimento de água para residências rurais. Foi realizado o dimensionamento e a otimização do sistema, a fim de avaliar a área do coletor solar, o volume do *boiler*, e a potência elétrica auxiliar, para obter a temperatura desejada, utilizando a menor quantidade de calor possível.

A fim de obter modelos matemáticos, que representem sistemas de aquecimento solar de forma mais simples e de fácil aplicação, sem perder a precisão, Kicsiny (2018) propôs um modelo matemático de armazenadores solares baseado em regressão linear múltipla (MRL). Esse modelo foi validado utilizando dados experimentais e os resultados se mostraram promissores com erros de aproximadamente 6,2%.

A aplicação de controladores em sistemas de aquecimento solar é uma técnica relativamente nova, como pode ser visto no trabalho de Kicsiny (2015) que propôs a modelagem matemática baseada em função de transferência para um sistema de aquecimento solar. A partir desse modelo, foi implementado um controlador do tipo PI, e, através das simulações, o autor afirmou que o controlador PI proposto é apropriado para o objetivo de controle, devido a sua precisão e rapidez de resposta, quando implementadas perturbações ao sistema.

Partindo desse pressuposto, o objetivo do presente trabalho foi propor a melhor configuração para um sistema auxiliar de aquecimento de utilidades, para fins industriais, utilizando a radiação solar como fonte alternativa de energia. O propósito foi promover o maior aproveitamento da energia solar e o menor consumo de fonte energia não renovável. Para avaliar a aplicabilidade desse sistema, desenvolveu-se o modelo matemático e posteriormente implementou-se dois tipos de controladores: *on/off* e PI, com a finalidade de melhorar o aproveitamento das fontes de energia disponíveis. Após as simulações, foi possível determinar qual a economia em gasto energético e qual foi o controlador mais

indicado para o processo em questão.

2. Metodologia

Este trabalho possui natureza teórico-computacional e utilizou o *software* livre, Scilab®, para realizar as simulações computacionais do modelo matemático dos sistemas estudados. Além disso, foram estudados três tipos de configurações para o sistema de aquecimento de utilidades em um processo genérico, sendo composto por um coletor solar de placa plana, um tanque de aquecimento e um trocador de calor. O fluido aquecido pelo coletor solar foi a água, responsável por transferir calor para um determinado fluido no trocador de calor (fluido de trabalho).

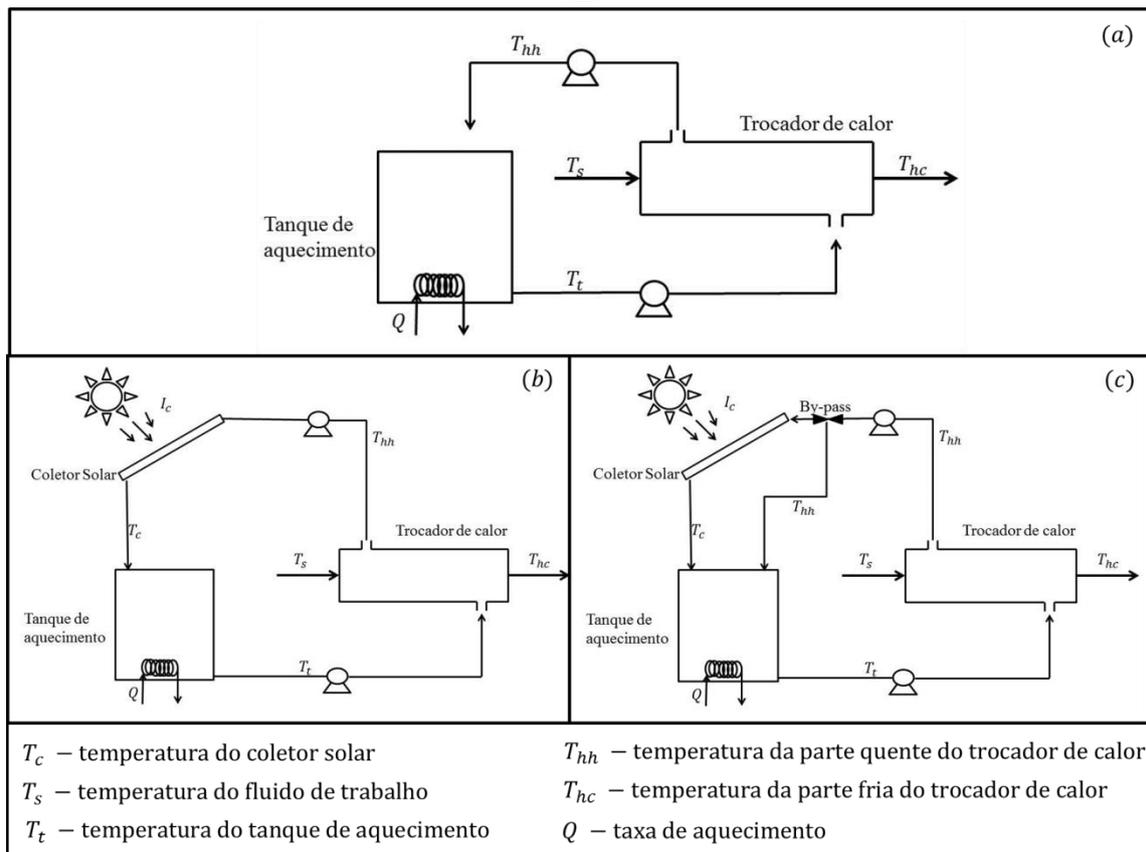
A Figura 2 representa os esquemas dos sistemas estudados neste trabalho. A Figura 2a é o sistema I, que é composto apenas pelo tanque de aquecimento e trocador de calor, não havendo a presença do coletor solar. Este tipo de configuração de sistema é a mais comumente utilizada. O tanque de aquecimento é o responsável pelo total fornecimento da quantidade de calor requerida pelo processo nessa configuração, e a corrente aquecida pelo tanque é utilizada para promover a troca térmica com a corrente de trabalho a ser aquecida, no trocador de calor. Neste caso, a fonte de energia utilizada seria uma fonte não renovável, proveniente da queima de combustíveis fósseis.

O sistema II representado na Figura 2b, além da presença do trocador de calor e do tanque de aquecimento, possui o coletor solar. A corrente é alimentada ao coletor solar, durante as 24 horas do dia, mesmo nos períodos em que não há a presença de luz solar. Nesta configuração, o coletor solar tem a função de fornecer a máxima quantidade de calor possível à corrente de aquecimento. Porém, se o equipamento não for capaz de fornecer totalmente esta energia, esta corrente passa por uma segunda fonte de aquecimento, o tanque de aquecimento, que termina de fornecer a quantidade de calor necessária para o aquecimento. A corrente aquecida pelo tanque, também promove troca térmica com a corrente de trabalho no trocador de calor.

A Figura 2c representa a configuração do sistema III, um sistema solar híbrido, no qual a corrente é alimentada ao coletor solar apenas no período de 10h até 17h, pois é entre esses horários que há uma maior incidência de luz solar. Sendo assim, nos períodos com alta radiação solar, o coletor solar é responsável por fornecer calor à corrente do processo, esta corrente é alimentada no tanque de aquecimento para receber o restante da quantidade de calor necessária para atingir o valor desejado. Caso o período seja de baixa radiação, a

corrente não será alimentada ao coletor, e será bombeada diretamente para o tanque de aquecimento. O tanque possui uma serpentina de aquecimento fornecendo uma quantidade de calor Q necessária para atingir a temperatura ideal. Após atingir essa temperatura ideal, a corrente é então utilizada no trocador de calor para promover a troca térmica com a corrente de trabalho.

Figura 2: Esquema dos sistemas de estudo: (a) Sistema I, (b) Sistema II e (c) Sistema III.



Fonte: Dos autores.

Nos três sistemas, a operação iniciou-se às 0 h, com a temperatura inicial igual à temperatura ambiente ($25,0^{\circ}\text{C}$), sendo assim considerado o processo de *startup* da planta. A temperatura da corrente a ser aquecida (T_s), permaneceu constante e igual a $25,0^{\circ}\text{C}$, e esta deve ser aquecida até $63,6^{\circ}\text{C}$ – temperatura determinada para operação ($T_{hc_{sp}}$ - *setpoint*).

2.1. Modelo matemático

O modelo matemático estudado foi proposto inicialmente por Kicsiny & Varga (2012), sendo alterado de acordo com as necessidades deste trabalho, e tendo o acréscimo da equação

do tanque de aquecimento. O modelo tem as seguintes temperaturas como variáveis de estado: coletor (T_c), tanque de aquecimento (T_t), parte quente do trocador de calor (T_{hh}) e parte fria do trocador de calor (T_{hc}). Esta sendo a variável controlada do processo. No sistema I, o modelo não possui T_c como variável de estado, pois não apresenta o coletor solar na sua configuração (Figura 2a).

Neste trabalho foi considerado que as temperaturas (T_c, T_t, T_{hh}, T_{hc}) são homogêneas e variáveis com o tempo, a mistura é perfeita e irradiação total - I_c é perpendicular ao coletor. Além disso, considerou apenas as perdas por convecção natural e as perdas de massa durante a operação foram consideradas desprezíveis.

O modelo matemático foi obtido pela aplicação do princípio de conservação de energia ao coletor solar, trocador de calor (parte quente e parte fria) e tanque de aquecimento, obtendo assim as Equações 1 a 4. A nomenclatura dos parâmetros utilizados está disposta na Tabela 3.

A temperatura para o coletor solar para os sistemas II e III, é representada pela Equação 1:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{A_c \eta_0}{\rho_c c_c V_c} I_c + \frac{U_L A_c}{\rho_c c_c V_c} (T_{ca} - T_c) + \frac{\dot{V}_c}{V_c} (T_{hh} - T_c) \quad (1)$$

A temperatura do tanque de aquecimento é representada pela Equação 2:

$$\frac{dT_t}{dt} = \frac{\dot{V}_c}{V_t} (T_c - T_t) + \frac{Q}{\rho_c c_c V_t} + \frac{A_t k_t}{\rho_c c_c V_t} (T_{sa} - T_t) \quad (2)$$

A parte quente do trocador de calor, tem sua temperatura representada pela Equação 3:

$$\frac{dT_{hh}}{dt} = \frac{\rho_c c_c \dot{V}_c}{\frac{c_h m_h}{2} + \rho_c c_c \frac{V_h}{2}} (T_t - T_{hh}) + \frac{\varepsilon k_h A_h}{\frac{c_h m_h}{2} + \rho_c c_c \frac{V_h}{2}} (T_{hc} - T_{hh}) + \frac{\frac{A_a k_a}{2}}{\frac{c_h m_h}{2} + \rho_c c_c \frac{V_h}{2}} (T_{ha} - T_{hh}) \quad (3)$$

A temperatura da parte fria do trocador de calor é representada pela Equação 4:

$$\frac{dT_{hc}}{dt} = \frac{\rho_s c_s \dot{V}_s}{\frac{c_h m_h}{2} + \rho_s c_s \frac{V_h}{2}} (T_s - T_{hc}) + \frac{\varepsilon k_h A_h}{\frac{c_h m_h}{2} + \rho_s c_s \frac{V_h}{2}} (T_{hh} - T_{hc}) + \frac{\frac{A_a k_a}{2}}{\frac{c_h m_h}{2} + \rho_s c_s \frac{V_h}{2}} (T_{ha} - T_{hc}) \quad (4)$$

A fim de obter valores mais próximos possíveis dos valores reais, para os coeficientes de perda de calor, foi utilizada a Equação 5 (Incropera, et al., 2011) que representam a convecção natural.

$$U_l = \frac{k_w C (G_r P_r)^n}{L} \quad (5)$$

em que: G_r é o número de Grashof calculado por $G_r = \frac{\beta g (T_c - T_{ca}) L^3}{\nu^2}$ e coeficiente de expansão volumétrica térmica representado por $\beta = \frac{2}{T_c + T_{ca}}$ (Gomes Filho, 2013 *apud* Yunus, 2009).

2.2. Controlador ON/OFF e controlador PI

No caso de um controle de temperatura utilizando controladores *on/off*, o sistema de aquecimento é acionado quando a variável do processo for menor que o valor de *setpoint*. Ao contrário, o sistema de aquecimento é desligado quando se tem um valor maior da variável de processo em relação ao *setpoint* (Franco, et al., 2014).

Neste trabalho, o controlador *on/off* foi aplicado ao sistema II e III e o objetivo é controlar o valor da temperatura da parte fria do trocador de calor (T_{hc}). A fim de obter a resposta desejada, a temperatura da parte fria do trocador de calor foi controlada manipulando a taxa de calor (Q) fornecida ao tanque de aquecimento pela serpentina. Caso o valor de T_{hc} estiver menor que o *setpoint* ($63,6^\circ\text{C}$), o sistema de aquecimento, formado pela serpentina, fornece ao tanque uma taxa de calor igual a $30.150,0\text{W}$. Se a temperatura for menor ou igual ao *setpoint* o sistema de aquecimento é desligado, não fornecendo mais calor ao tanque de aquecimento.

O controlador proporcional e integral (PI), também foi aplicado aos sistemas II e III. O valor de *setpoint* analisado foi igual ao do controlador *on/off*. A equação geral para um controlado PI é dado pela Equação 6.

$$p_m(t) = k_c e(t) + \frac{k_c}{\tau_I} \int_0^t e(t) dt \quad (6)$$

A fim de obter o comportamento da variável de interesse com o tempo, a Equação 6 é derivada, chegando então, a Equação 7.

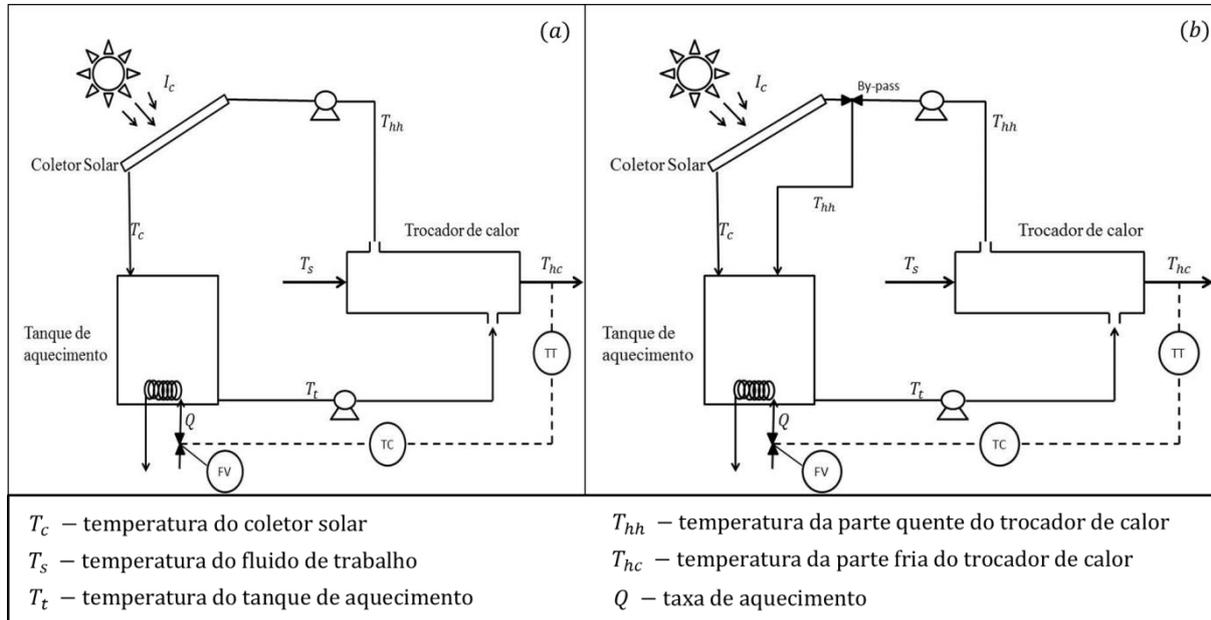
$$\frac{dp_m}{dt} = -k_c \frac{dp}{dt} + \frac{k_c}{\tau_I} (p_{sp} - p) \quad (7)$$

Para o processo estudado neste trabalho, a equação do controlador PI é representada pela Equação 8.

$$\frac{dQ}{dt} = -k_c \frac{dT_{hc}}{dt} + \frac{k_c}{\tau_I} (T_{hcsp} - T_{hc}) \quad (8)$$

As malhas de controle para o sistema II e III são apresentadas na Figura 3. Em que TT é o transmissor de temperatura, TC o controlador de temperatura e FV a elemento final de controle.

Figura 3: Esquema da malha de controle: (a) sistema II e (b) sistema III.



Fonte: Dos autores.

2.3. Dados do processo

Os parâmetros utilizados para a simulação do modelo estão listados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros da simulação.

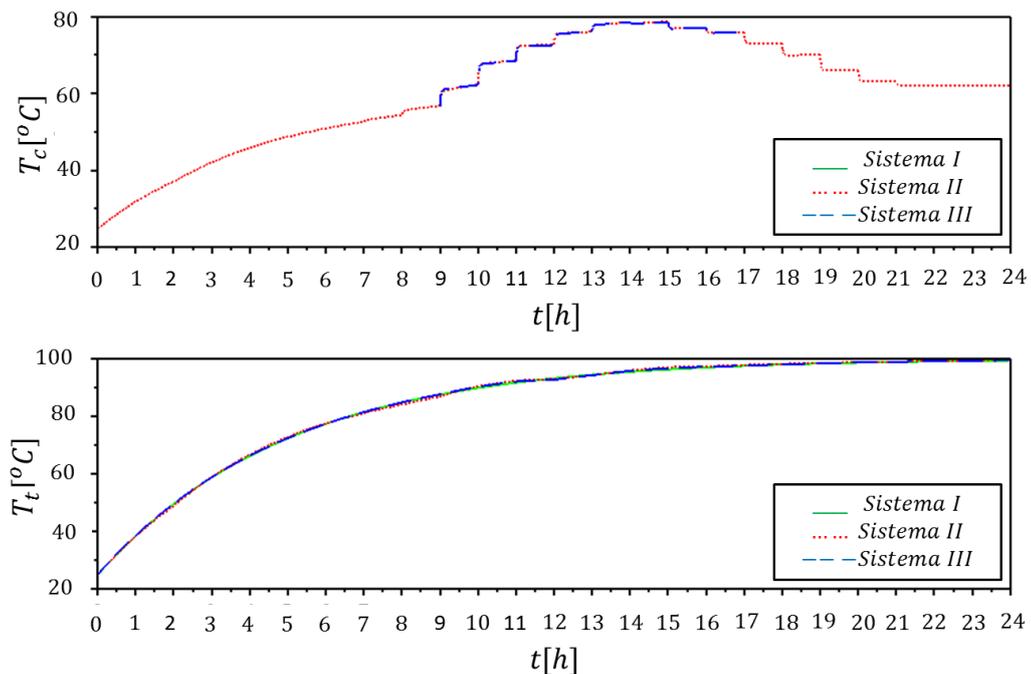
$A_a = 0,24 \text{ m}^2$	$\eta_0 = 0,74$	$T_{ca} = 25^\circ \text{C}$
$A_c = 33,30 \text{ m}^2$	$c_s = 4.015,20 \text{ Jkg}^{-1} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$	$T_h = 25^\circ \text{C}$
$A_h = 2,00 \text{ m}^2$	$\dot{V}_c = 2,72 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$T_{ha} = 25^\circ \text{C}$
$A_t = 4,00 \text{ m}^2$	$\dot{V}_s = 1,75 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$k_w = 2,00 \text{ Wm}^{-2} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$
$\rho_s = 1.099,50 \text{ kgm}^{-3}$	$m_h = 37,00 \text{ kg}$	$C = 0,15$
$\rho_c = 1.000,00 \text{ kgm}^{-3}$	$g = 9,80 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$P_r = 0,707$
$V_c = 2,70 \times 10^{-2} \text{ m}^3$	$\epsilon k_h = 2461,50 \text{ Wm}^{-2} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$	$n = 1/3$
$V_t = 2,00 \text{ m}^3$	$k_t = 1,00 \text{ Wm}^{-2} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$	$L = 2,00 \text{ m}$
$V_h = 0,05 \times 10^{-1} \text{ m}^3$	$k_a = 5,00 \text{ Wm}^{-2} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$	$\nu = 15,73 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
$c_h = 464,80 \text{ Jkg}^{-1} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$	$T_s = 25^\circ \text{C}$	$k_c = 9.000$
$c_c = 3.623 \text{ Jkg}^{-1} \text{ }^\circ \text{C}^{-1}$	$T_{sa} = 25^\circ \text{C}$	$\tau_I = 11.000$

Os valores da irradiação solar (I_c), e de todas as temperaturas ambiente, foram retiradas do site *INMET* (Instituto Nacional de Meteorologia), para o mês de Janeiro de 2018. Os valores de k_c e τ_l foram ajustados manualmente de acordo com a resposta de interesse. As simulações para os modelos, com e sem controlador, foram realizadas utilizando o *software* livre Scilab®, utilizando o solucionador *lsoda* do pacote ODEPACK.

3. Resultados e discussão

A Figura 4 mostra o comportamento das temperaturas do coletor solar e do tanque de armazenamento para os três sistemas estudados sem controlador.

Figura 4: Comportamento da temperatura do coletor solar e tanque de aquecimento, sem controlador.



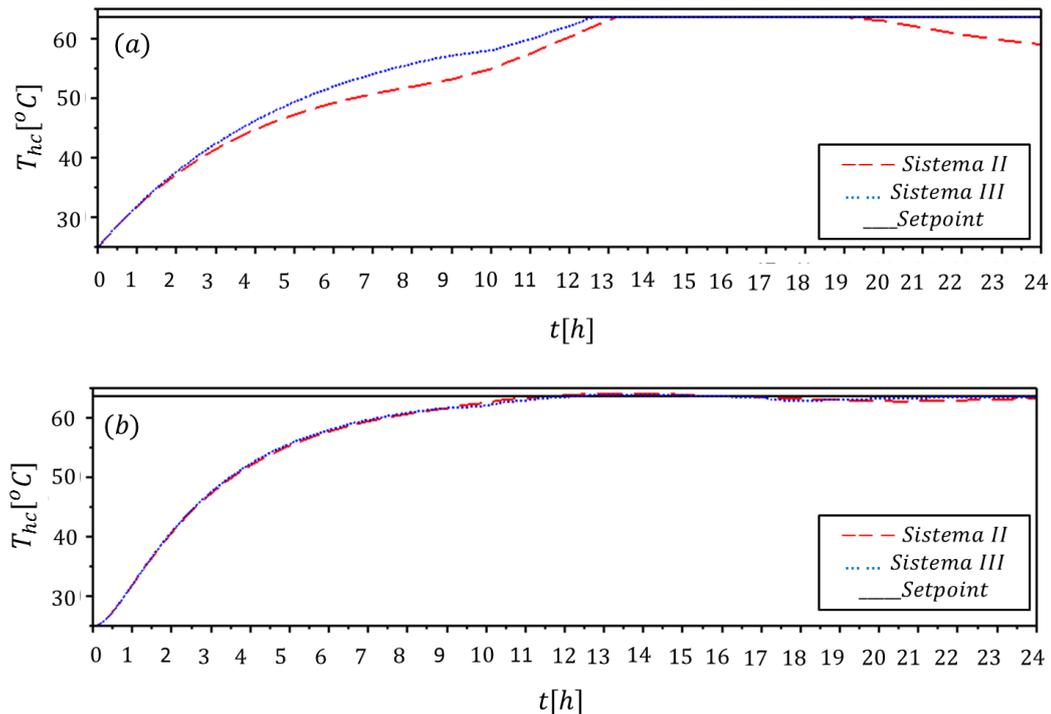
Fonte: Dos autores.

Neste caso, pode-se notar que as temperaturas para os três sistemas sem a presença de controlador tem um comportamento semelhante. No caso do sistema II, o comportamento da temperatura do tanque (T_t) é semelhante, pois este recebe uma taxa de calor maior nos horários em que não há radiação solar tão evidente (Figura 6). A temperatura do coletor solar

(T_c) tem sua máxima atingida às 13h, período do dia onde há maior incidência de radiação solar, portanto, o coletor é capaz de transferir maior quantidade de calor para a corrente.

A Figura 5, apresenta o comportamento da temperatura da parte quente do trocador de calor (T_{hc}) para os sistemas II e III após a implementação dos controladores *on/off* (Figura 5a) e PI (Figura 5b).

Figura 5. Comportamento da temperatura da parte fria do trocador de calor (variável controlada), com controlador: (a) Controlador *on/off*, (b) Controlador PI.



Fonte: Dos autores.

Analisando a Figura 5, nota-se que a temperatura máxima é atingida no período entre 13h e 15h para os dois sistemas, como mostrado anteriormente (Figura 4), é o período do dia com maior incidência de radiação solar, proporcionando ao coletor solar maior capacidade de fornecer calor ao fluido de aquecimento.

Pela Figura 5a, pode-se perceber que as temperaturas do sistema III são maiores que as do sistema II no período de 0 às 10h, isso ocorreu porque a corrente não passa pelo coletor solar durante todo o processo, fazendo com que sistema III alcançasse o *setpoint* em um menor intervalo de tempo e se mantivesse nele.

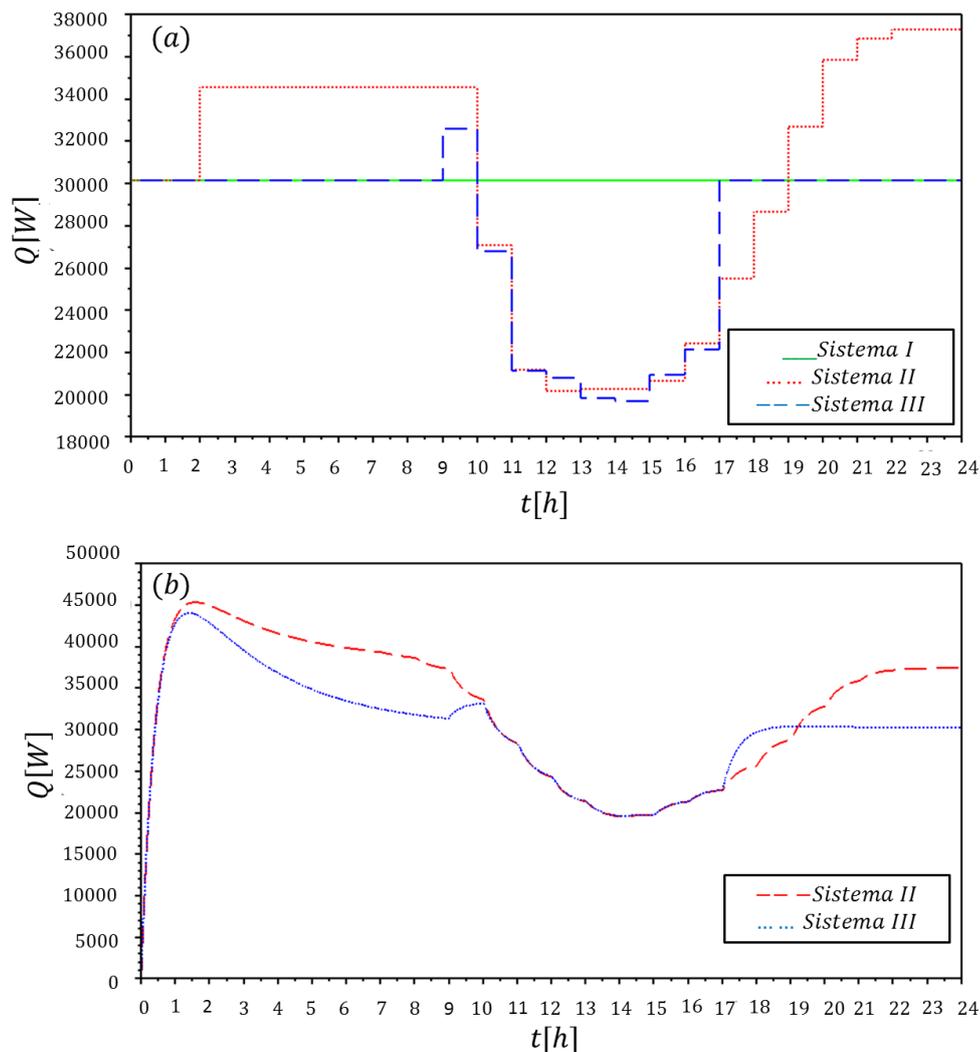
Avaliando a Figura 5b, nota-se que o comportamento da temperatura para os dois sistemas foram semelhantes, neste caso o controlador PI foi capaz de alcançar e manter a temperatura de ambos os sistemas no valor desejado. Além disso, as temperaturas alcançaram

o valor do *setpoint* mais rapidamente, aproximadamente às 11h, como o esperado para esse tipo de controlador.

Neste trabalho, a taxa de calor para o controlador *on/off* variou rapidamente entre 0 e 30.150,0W - valores de projeto. Logo, isso não foi o suficiente para manter a temperatura do sistema II no valor requerido no período sem radiação solar, fazendo com que ela decrescesse (Figura 5a). Para o controlador PI, a faixa de variação da taxa de calor foi mais ampla, fazendo com que a temperatura da variável controlada fosse mantida até o final da simulação para os sistemas II e III (Figura 5b).

A Figura 6 representa a variação da taxa de calor com o tempo para as simulações dos sistemas antes e depois da implementação dos controladores.

Figura 6. Taxa de calor requerida pelos sistemas: (a) Sem Controlador, (b) Controlador PI.



Fonte: Dos autores.

Analisando a Figura 6, é visível que, o sistema II, em ambos os casos, requer uma quantidade maior de calor que o sistema híbrido, principalmente nos períodos sem a presença da radiação solar tão evidente (0 às 10h e de 19 às 24h). A passagem da corrente de aquecimento pelo coletor solar nesses períodos faz com que aconteçam perdas de calor nesse percurso, e assim, o tanque de aquecimento deve fornecer uma taxa de calor superior ao fluido de aquecimento para que este seja capaz de manter a temperatura da corrente de trabalho no valor do *setpoint*.

A diferença entre as Figuras 6a e 6b está no pico apresentado pelo processo com controlador PI, isso se deve ao fato desse controlador ser capaz de adaptar a taxa de calor a fim de obter a resposta de maneira mais rápida possível, ou seja, atingir o valor do *setpoint* mais rápido que os demais sistemas estudados.

A fim de comparar a economia de energia para cada configuração estudada, foi calculada a média da taxa de calor requerida para manter a temperatura da corrente de saída do trocador de calor (T_{hc}) no valor desejado. Estes valores se encontram na Tabela 2.

Tabela 2: Taxa média de calor fornecido pelo tanque de aquecimento.

$Q_{médio} [W]$			
	Sistema I	Sistema II	Sistema III
Sem controlador	30.150,00	30.123,50	27.766,70
Controlador <i>on/off</i>	-	28.467,90	28.453,50
Controlador PI	-	32.701,80	30.089,10

Para as três análises, sem controlador, com controlador *on/off* ou com controlador PI, o sistema III foi o que economizou mais energia, em todas as três observações. Isso se explica, pelo fato de que, a corrente do fluido de aquecimento não é alimentada ao coletor solar nos períodos com pouca radiação solar, evitando a perda de calor nesse equipamento através das trocas térmicas. Analisando as médias, o controlador *on/off* proporcionou menores médias que o controlador PI, porém, as diferenças foram muito pequenas, 14,90% para o sistema II e 5,70% para o sistema III, comparadas com os grandes desgastes provocados pelos esforços de um controlador *on/off*. Além disso, o controlador PI consegue alcançar o valor de 63,6°C, para a temperatura da parte fria do trocador de calor, mais rapidamente que os demais processos.

Os resultados encontrados neste trabalho para o aquecimento solar, sem a implementação do sistema de controle, ficaram condizentes com os da literatura. A

temperatura máxima atingida para fluido no coletor solar foi de aproximadamente 80°C , como nos trabalhos de Kicsiny, et al. (2014) e Tavares & Sousa (2018). O estudo para a implementação de um controlador ao sistema de aquecimento solar, pode ser encontrado no trabalho de Fontalvo, et al. (2014), mas para modelos matemáticos diferentes os quais levaram em consideração outras malhas de controle, o que dificulta a comparação. Mas vale salientar que os resultados encontrados nesse trabalho foram semelhantes aos obtidos por este estudo, levando a conclusão de que sistemas de controle *feedback* são mais adequados, pois fornecem menos esforço ao processo, e um alcance mais rápido do valor do *setpoint*.

4. Conclusões

Com relação às temperaturas avaliadas, a temperatura do coletor solar atingiu sua máxima de aproximadamente 80°C , entre as 13 e 15 h, sempre o mesmo período para todos os processos que possuía o coletor solar. Essa máxima foi possível, devido ao fato de nesse período do dia, o sol proporcionar uma maior radiação, fazendo com que o coletor transfira uma alta quantidade de calor à corrente de aquecimento.

As temperaturas do tanque de aquecimento, da parte quente do trocador de calor e da parte fria, se comportaram de maneira semelhante em relação a cada configuração. Para as análises sem controlador, e no caso do controlador *on/off*, as temperaturas na configuração do sistema III foram maiores e assim atingiram o valor do *setpoint* desejado mais rapidamente, entre 11-12 h, quando comparadas ao sistema II. Isso ocorreu pelo fato, de no sistema híbrido, a corrente não ser alimentada ao coletor solar nos períodos sem grande incidência solar, e assim, não perder calor nesse percurso. Esse mesmo fato, explica a queda que existe nas temperaturas quando implementado o sistema *on/off*, após às 19 h. Além disso, só foi permitido ao controlador *on/off* variar a taxa de calor entre 0 e 30.150,00W, sendo este o valor de projeto estipulado para este estudo.

Em questão de economia, para todos os processos, com ou sem controladores, o sistema híbrido foi o que mais economizou energia quando comparado ao sistema I. Gerando uma economia de aproximadamente 8,0%, 6,0% e 0,2% por dia de operação, para os sistemas sem controlador, controlador *on/off* e controlador PI, respectivamente.

Comparando os controladores entre si, o controlador *on/off* economiza mais energia que o PI, uma economia de 14,90% e 5,70% em relação ao controlador PI, para os sistemas II e III, respectivamente. Porém, o controlador *on/off* requer um grande esforço no seu acionamento, provocando um grande desgaste da válvula de controle, então, a diferença de

energia é muito pequena quando comparada com esse gargalo encontrado em um controlador *on/off*.

Além disso, as temperaturas com o controlador PI alcançaram o valor de *setpoint* mais rapidamente e permaneceram nesse valor até o fim das simulações. Assim, é possível dizer que, o controlador PI com a configuração híbrida possui potencial para ser usado em um processo que utiliza de um coletor solar como fonte alternativa de energia.

Outra forma de melhor avaliar a eficiência das configurações estudadas, principalmente para sistema III com controlador PI, seria simular de forma contínua, com o intuito de verificar o comportamento para dias diferentes – ensolarados, chuvosos e nublados. Além disso, pode-se implementar a ação derivativa ao controlador PI, ou seja, um controlador PID e verificar se essa ação traria um melhor aproveitamento da fonte de energia renovável. A fim de avaliar sistemas industriais, pode ser feita a substituição do tanque de aquecimento por uma caldeira, para aproximar à maioria dos processos reais.

5. Nomenclatura

Na Tabela 3 estão dispostos os parâmetros utilizados neste trabalho.

Tabela 3: Nomenclatura.

Parâmetro	Descrição
$A[m^2]$	Área da superfície
$\eta_0[-]$	Eficiência ótica do coletor
$\rho[kgm^{-3}]$	Densidade
$c[Jkg^{-1}C^{-1}]$	Calor específico
$V[m^3]$	Volume
$I_c[Wm^{-2}]$	Irradiação solar global na superfície do coletor
$U_L[Wm^{-2}C^{-1}]$	Coefficiente de perda de calor no coletor solar
$T[^\circ C]$	Temperatura
$\dot{V}[m^3s^{-1}]$	Vazão volumétrica
$Q[W]$	Taxa de calor fornecida pela serpentina do tanque de aquecimento
$k[Wm^{-2}C^{-1}]$	Coefficiente de perda de calor
$m[kg]$	Massa

$\varepsilon k_h [Wm^{-2} C^{-1}]$	Coeficiente de transferência de calor dentro do trocador
$k_w [Wm^{-2} C^{-1}]$	Condutividade térmica do ar
$C [-]$	Constante de relação de Nusselt
$P_r [-]$	Número de Prandtl
$n [-]$	Constante da correção de Nusselt
$L [m]$	Comprimento da placa
$g [m^2 s^{-1}]$	Aceleração da gravidade
$\nu [m^2 s^{-1}]$	Viscosidade cinemática
$k_c [-]$	Constante do ganho proporcional do controlador
$\tau_I [-]$	Constante de tempo integral do controlador
Subscrito	
c	Coletor solar
ca	Ambiente do coletor solar
ha	Ambiente do trocador de calor
sa	Ambiente do tanque de aquecimento
t	Tanque de aquecimento
h	Trocador de calor
s	Fluido a ser aquecido

Referências

Cardoso, R. B. & Campos, O. C. (2017). Impacts of climate variables in energy generation on the photovoltaic system of the UNIFEI, in Itabira city. *Revista SODEBRAS*, 12, 295-299.

Fonseca, J. P. S. M. & Ferrari, E. M. M. & Cardoso, R. B. (2018). Análise dos impactos energéticos e econômicos do programa brasileiro de etiquetagem energética (PBE/Inmetro) em coletores solares térmicos do Brasil. *Research, Society and Development*, 7(1), 01-17. doi:10.17648/rsd-v7i1.101

Fontalvo, A. & Garcia, J. & Sanjuan, M. & Padilla, R. V. (2014). Automatic control strategies for hybrid solar-fossil fuel power plants, *Renewable Energy*, 62, 424-431. doi:10.1016/j.renene.2013.07.034

Franco, P. R. V. & Lugli, A. B. & Henriques, J. P. C. (2014) Comparação entre sistemas de controle para fornos industriais. *Brazil Automation*, 1,1-18.

Gnoatto, E. & Dallacort, R. & Ricieri, R. P. & Silva, S. L.; Ferruzi, Y. (2008). Eficiência de um conjunto fotovoltaico em condições reais de trabalho na região de Cascavel. *Acta Scientiarum Technology*, Maringá, 30(2), 215-219. doi:10.4025/actascitechnol.v30i2.5496

Gomes Filho, C. A. (2013). Análise preliminar para estimativa da perda de calor sensível de um fluido homogêneo térmico em um reservatório de geométrica cilíndrica. *Trabalho de conclusão de curso. Faculdade de Engenharia (FEG)*. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

Incropera, F. P. & Dewitt, D. P. & Bergan, T. L. & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*, 6 ed. Rio de Janeiro: LTC.

Instituto Nacional de Meteorologia. (2018). Acessado em 09 janeiro 2018, em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>.

Kicsiny, R. (2015). Transfer function of solar heating systems for dynamic analysis and control design. *Renewable Energy*, 77, 64-78. doi: 10.1016/j.renene.2014.12.001

Kicsiny, R. (2018). Black-box model for solar storage tanks based on multiple linear regression. *Renewable Energy*, 125, 857-865. doi: 10.1016/j.renene.2018.02.037

Kicsiny, R. & Nagy, J. & Szalóki, Cs.(2014). Extended ordinary differential equation models for solar heating systems with pipes. *Applied Energy*, 129, 166-176. doi:10.1016/j.apenergy.2014.04.108

Kicsiny, R. & Varga, Z. (2012). Real-time state observer design for solar thermal heating systems. *Applied Mathematics and Computation*, 218, 11558-11568. doi:10.1016/j.amc.2012.05.040

Martins, F. R. & Abreu, S. L. & Pereira, E. B. (2012). Scenarios for solar thermal energy application in Brazil. *Energy Policy*, 48, 640-649. doi: 10.1016/j.enpol.2012.05.082

Medeiros, M. & Nogueira, C. E. C. & Siqueira, J. A. C. & Lawder, J. H. & Souza, S. N. M. & Fracaro, G. P. M. (2013). Optimizing a mixed water heating system (solar and electric) for rural areas. *Acta Scientiarum Technol*, Maringá, 35 (1), 69-74. doi:10.4025/actascitechnol.v35i1.11998

Mekhilef, S. & Saidur, R. & Safari, (2011). A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1777-1790. doi: 10.1016/j.rser.2010.12.018

Oliveira, N. M. B. & Damasceno, J. J. R. & Vieira, L. G. M. (2009). Aprimoramento de aquecedores solares de baixo custo. Uberlândia: UFU.

Pereira, E. B & Martins, F. R. & Gonçalves, A. R. & Costa, R. S. & Lima, F. J. L. & Rütther, R. & Abreu, S. L. & Tiepolo, G. M. & Pereira, S. V. & Souza, J. G. (2017). *Atlas brasileiro de energia solar*. 2.ed. -- São José dos Campos : INPE.

Silva, R. M. (2015). Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios. Brasília: *Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado*.

Tavares, S. R. & Sousa, N. G. (2018). Sistema de aquecimento solar de água: simulação e análise, *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 4(1), 15-31. doi:10.18554/rbcti.v4i1.3360

Yunus, A. C. & Moura, L. F. M. & Ismail, K. A. R. (2009). *Transferência de calor de massa: uma abordagem prática*. 3 ed. São Paulo: MCGraw-Hill do Brasil.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Silas Tavares Silva – 50%

Nádia Guimarães Sousa – 50%