

# PLANTA DIDÁTICA TERMOSOLAR PARA ESTUDO EM ENERGIA RENOVÁVEL COM APLICAÇÕES EM: MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE

THERMOSOLAR DIDACTIC PLAN FOR RENEWABLE ENERGY STUDY WITH APPLICATIONS: MODELING, SIMULATION AND CONTROL

Matheus Oliveira de Brito<sup>1</sup>, Marcus Vinicius Americano<sup>2</sup>, Iuri Muniz Pepe<sup>3</sup>

## RESUMO

Este trabalho propõe uma planta termosolar didática para estudos de modelos, simulações e controle de processos. Além da estrutura física da planta, foram desenvolvidos alguns instrumentos para o sensoriamento de grandezas físicas importantes, tais como irradiância solar e o estado da válvula de controle. Um dos objetivos deste trabalho é oferecer um ambiente de estudo que aproxima os fundamentos teóricos de ensino à realidade industrial, uma filosofia primordial para a área de educação na engenharia. A planta termosolar permite análises e aplicações em modelagem, simulação e controle por meio dos *softwares* Matlab/Simulink e Labview. Um estudo de caso é apresentado de forma a demonstrar as funcionalidades do sistema proposto, sendo esta uma aplicação de controle com erro máximo observado menor que 0.2%.

**Palavras-chave:** energia solar; educação na engenharia; planta didática; modelagem; simulação, controle.

## ABSTRACT

This work presents a didactic plant for model studies, simulations and process control. In addition to the physical structure of the plant, some instruments were developed for the sensing of important physical quantities, such as solar irradiance and the state of the control valve. One of the objectives of this work is to offer a study environment that approximates the theoretical foundations of teaching to the industrial reality, a primordial philosophy for the area of education in engineering. The thermosolar plant allows analysis and applications in modeling, simulation and control through Matlab / Simulink and Labview softwares. A case study is presented in order to demonstrate the functionalities of the proposed system that is a control application with observed maximum error lower than 0.2%.

**Keywords:** solar energy; engineering education; didactic plant; modeling; simulation; control.

---

<sup>1</sup> Matheus Oliveira de Brito. Mestrando no Programa de Pós-graduação em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia; matheusbrito@hotmail.com.br

<sup>2</sup> Prof. Dr. Marcus Vinicius. Universidade Federal da Bahia; marcus.americano@ufba.br

<sup>3</sup> Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe. Universidade Federal da Bahia; lapo.if@gmail.com

## INTRODUÇÃO

A necessidade de desenvolver novas formas de utilização de energias renováveis vem crescendo ao longo dos anos, desde os primeiros trabalhos na década de 1970, logo após a primeira crise do petróleo. Durante esse período foi estimulada a pesquisa de diferentes energias alternativas, dentre elas a energia solar, que apesar do interesse inicial logo sofreu relativo desinteresse com a queda do preço do óleo fóssil (CAMACHO et al., 2012). Segundo AISA e IQBAL (2016) e EPE (2007), outros dois fatores causaram a retomada do interesse por energias renováveis: (i) o aumento periódico do preço da energia elétrica; geralmente oriunda de processo com potencial perigo para o meio ambiente, mesmo quando se trata de fonte hidrelétrica, (ii) o aquecimento global; hoje amplamente comentado na literatura. Vale salientar que há sistemas de energia solar-térmica que também produzem energia elétrica.

A energia solar pode ser transformada em energia elétrica, por meio de um processo direto com a tecnologia das células fotovoltaicas, pode também ser transformada em energia térmica quando a tecnologia escolhida é a dos coletores solares que absorvem a irradiação para aquecer um fluido, através da troca térmica com o material que compõe o coletor. Diversas são as aplicações da energia solar térmica, que vão desde o aquecimento doméstico, passando pelo aquecimento de água em *resorts*, ou ainda na indústria cimenteira e do etanol (ALSHARKAWI; ROSSITER, 2017; COSTA et al., 2013; RIZZI et al., 2017; GERARD et al., 2017).

Por outro lado, com a necessidade de se desenvolver e melhorar a eficiência energética de processos industriais de forma limpa, fica evidente o papel protagonista do ensino e da pesquisa na área de aproveitamento da energia solar, com o objetivo de otimizar esse aproveitamento e o consumo de energia, o que atribui reconhecida importância aos centros de pesquisa e universidades, geralmente responsáveis pelo fomento à inovação

tecnológica e científica (GARCIA et al., 2015).

A integração entre as organizações públicas de pesquisa e ensino com a indústria é objeto de estudo de diversos autores, dentre estes se destacam: Carayol (2004); Intarakumnerd e Schiller (2009); Jensen et al. (2007); Bozeman e Corley (2004) e Fuentes, Dutrénit et al. (2012). Nos trabalhos desses autores são discutidas a importância da interação empresa-escola para o benefício mútuo, a forma como isso acontece e as maneiras de potencializar o esforço de trabalho entre essas esferas. Um dos mais relevantes pontos para uma boa integração entre as indústrias e as universidades é a formação do profissional, tanto na área acadêmica quanto na área industrial.

Nesse ponto, particularmente, um dos caminhos encontrados pelas universidades para aproximar os futuros profissionais de engenharia do mercado de trabalho é a utilização de métodos de aprendizado baseado em projetos e a vivência de ações empíricas. Para a aplicação dessas formas de ensino destaca-se a utilização das plantas didáticas como instrumento para a capacitação de profissionais. Muitos trabalhos propõem essa ferramenta metodológica nos variados segmentos da engenharia, que vão desde a biomédica até controle e automação. Dentre eles, podem ser destacados os trabalhos de Sclaro et al. (2009), que propôs um sistema de aquisição de dados para sinais bioelétricos, em que o estudante pode observar o comportamento desses sinais com a ajuda de um *software*.

O trabalho de Pandini et al. (2017) propôs uma bancada didática para estudos em automação industrial, com o objetivo de proporcionar a atuação nas áreas de programação e aplicação de controladores lógicos programáveis, além do estudo de sistemas não lineares e instáveis, realizado por Ribeiro et al. (2014) em um sistema mecânico de pêndulo invertido. Finalmente, considerando a necessidade do desenvolvimento energético na indústria no que tange às energias renováveis, destaca-se a planta híbrida para geração de energia elétrica

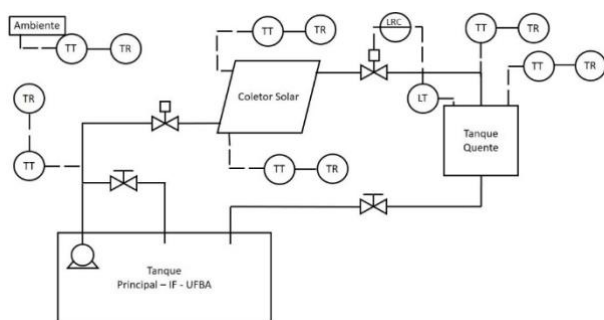
de origem eólica e hidráulica desenvolvida por Leach et al. (2009). Portanto, observa-se a importância das plantas didáticas para a imersão tecnológica dos estudantes de engenharia.

Demonstrada a importância de se aliar a pesquisa da área de energias renováveis com as práticas industriais, este trabalho propõe uma planta Termosolar, com potenciais didáticos com abrangência nas áreas de simulação, modelagem, controle e suas aplicações. Este artigo se divide em mais quatro seções: (i) a construção da planta Termosolar, (ii) a modelagem e identificação do sistema, (iii) um estudo de caso e, por fim, (iv) as conclusões.

## CONSTRUÇÃO DA PLANTA

Fisicamente a planta desenvolvida se encontra na cobertura do Instituto de Física (IF) da Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, Latitude: 12° 58' 13" sul, Longitude: 38° 30' 45" oeste. O processo ligado à planta proposta consiste no aquecimento de um fluido (água) através de um coletor solar plano aberto. O fluido de entrada está localizado em um tanque de água fria situado na galeria de serviço abaixo da cobertura do IF, com isso foi necessária a circulação forçada por bombeamento da água a ser aquecida. O fluido bombeado entra na parte inferior do coletor onde é aquecido e segue para o tanque de fluido quente que, por diferença de potencial, retorna ao tanque de água fria. O sistema está representado pelo diagrama da Figura 1.

Figura 1 – Diagrama da planta termosolar.



Fonte: acervo dos autores.

Na Figura 1 é possível verificar que na entrada do coletor foi previsto um caminho de retorno para o tanque principal, este desvio pode ser acionado por uma válvula manual, caso as válvulas de controle sejam fechadas completamente. Isso evitou problemas com pressurização da linha ou sobrecarga na bomba. A válvula de controle, colocada na saída do coletor, antes do tanque quente, foi utilizada para o controle de vazão do processo de aquecimento do fluido, sendo a outra válvula de controle uma redundância dessa primeira e disponível para possíveis e futuras implementações de estratégias de controle.

## Estrutura

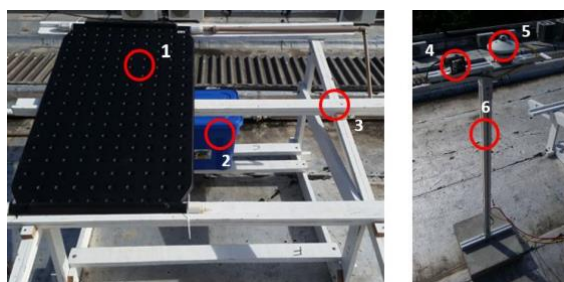
Visando a limitar o custo das instalações, foi desenvolvida e implementada uma estrutura em madeira pintada para a sustentação do coletor e do tanque de fluido quente. O suporte para os elementos de sensoriamento da irradiação foi construído em perfil de alumínio estruturado, fixado sobre um bloco de concreto, que serve de base inercial para esta estrutura em alumínio. Vale ressaltar que a estrutura fica exposta a ações das intempéries, por isso deve ter boa resistência mecânica e resistência à corrosão. Os projetos da estrutura foram desenvolvidos no CAD *SolidWorks*. Essa escolha foi feita em função de sua capacidade de modelagem de plantas de engenharia e partes mecânicas, sendo este um *software* tridimensional com capacidade de simulação de montagem e avaliação de performance (LIANG; YANG, 2010).

Os componentes eletrônicos responsáveis pelo processamento, atuação e sensoriamento da planta termosolar foram impermeabilizados por estruturas adicionais, a exemplo do microcontrolador Atmega 2560 e outras placas eletrônicas instaladas dentro de uma caixa padrão IP55, para comandos elétricos. O coletor utilizado foi de fabricação da Alpina, modelo 1003, em polietileno, com 0,83m<sup>2</sup> de área externa, com pressão de funcionamento até 50 KPa, 1,25m de comprimento, 0,75 m de largura, peso a vácuo de 4,6 kg e capacidade de circulação de 6 litros

por segundo INMETRO (2008). Este coletor foi escolhido em função de seu custo, apesar do fato de os coletores planos abertos apresentarem menor potencial de troca térmica que um coletor coberto.

O tanque quente sem isolamento utilizado possui dimensões suficientes para atender à necessidade do projeto. O critério para aquisição desse tanque foi o de que este não transbordasse a uma vazão de operação de 4 L/min, sendo que o escoamento do fluido contido nele devia ser feito pela pressão do próprio nível do tanque. A Figura 2 ilustra a estrutura descrita.

**Figura 2 – Estrutura física, Coletor (1), Tanque quente (2), Estrutura (3), Placa fotovoltaica (4), Piranometro (5) e Suporte da Instrumentação (6).**

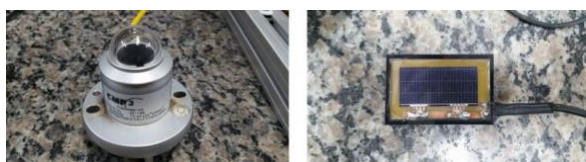


Fonte: acervo dos autores.

## Instrumentação

O sensoriamento e processamento das informações da planta foram de crucial importância para a realização deste trabalho, por terem sido fundamentais para a análise detalhada do processo.

**Figura 3 – Piranometro e a placa fotovoltaica.**



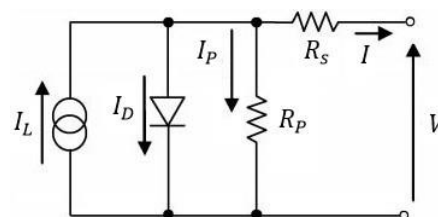
Fonte: acervo dos autores.

Um das grandezas que influenciam o processo de aquecimento de um fluido em um coletor solar-térmico é a quantidade de luz que chega a este dispositivo. Para a quantificação da grandeza irradiância, normalmente são

utilizados um ou mais piranômetros. O piranômetro é um sensor de resposta espectral ampla, alta precisão e alta resolução, que consegue mensurar a intensidade da radiação solar que chega numa determinada superfície. Um arranjo adequado, com mais de um sensor, permite determinar a irradiância de forma fracionada, sendo possível quantificar a influência da irradiação direta, difusa e global. Apesar de ser o mais utilizado para o sensoriamento da irradiância, o piranômetro tem alto custo, de \$1000,00 (mil dólares). De fato, o valor deste sensor inviabilizaria o seu uso em plantas didáticas, especialmente no caso de múltiplas plantas, o que é o caso para o atendimento de 15 a 20 estudantes de uma mesma turma.

Segundo Dunn, Gostein e Emery (2011) é possível estimar a irradiância solar por meio de células fotovoltaicas (PV). No trabalho de Bahir et al. (2015) foi utilizado o modelo dinâmico do circuito equivalente de uma placa fotovoltaica para estimar a irradiação local (ver Figura 4). Ao receber os raios solares, a PV passa a gerar corrente elétrica proporcional à intensidade da luz que a excita. Tal corrente pode ser transformada em tensão por meio de um resistor adicionado aos extremos do circuito apresentado na Figura 4. Desta forma, é possível medir a diferença de potencial diretamente relacionada com a irradiância solar, usando o conversor analógico para digital de um microcontrolador.

**Figura 4 – Circuito equivalente de uma PV ideal.**



Fonte: acervo dos autores.

Utilizando o circuito equivalente da Figura 4 é possível modelar o comportamento da célula fotovoltaica a partir das seguintes equações:

$$I = I_{SC} \left\{ 1 - c_1 \left( \exp \left[ \frac{V - \Delta V}{C_2 V_{OC}} \right] - 1 \right) \right\} \quad (1)$$

$$c_2 = \frac{V_{mp}/V_{OC} - 1}{\ln(1 - I_{mp}/I_{SC})} \quad (2)$$

$$c_1 = \left( 1 - \frac{I_{mp}}{I_{SC}} \right) \exp \left( - \frac{V_{mp}}{C_2 V_{OC}} \right) \quad (3)$$

$$\Delta I = \alpha \left( \frac{S}{S_{ref}} \right) \Delta T + \left( \frac{S}{S_{ref}} \right) I_{SC} \quad (4)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_S \Delta I \quad (5)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (6)$$

$$V_{novo} = V_{ref} + \Delta V \quad (7)$$

$$I_{novo} = I_{ref} + \Delta I \quad (8)$$

Onde:

V – tensão de saída do circuito;

$V_{OC}$  – tensão de circuito aberto;

$V_{mp}$  – tensão de máxima potência;

$V_{ref}$  – tensão nas condições de referência;

I – corrente de saída do circuito;

$I_{SC}$  – corrente de curto-circuito;

$I_{mp}$  – corrente de máxima potência;

$I_{ref}$  – corrente nas condições de referência;

$\alpha$  – coeficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito na radiação solar de referência;

$\beta$  – coeficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto na radiação solar de referência;

$R_S$  – resistência série;

S – radiação solar total no plano do gerador fotovoltaico;

$S_{ref}$  – radiação solar de referência;

T – temperatura da célula solar;

$T_{ref}$  – temperatura de referência da célula solar.

Neste sentido, foi desenvolvido um instrumento usando uma célula fotovoltaica de silício policristalino (PV) capaz de medir a irradiância horizontal global (GHI). A PV foi impermeabilizada para evitar os efeitos das intempéries e colocada em uma base-suporte em acrílico, que também serviu para a regulação da inclinação do novo instrumento.

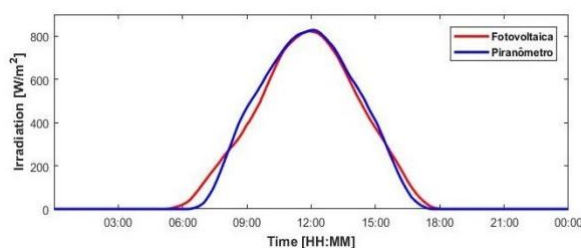
Durante a aquisição de dados foi constatada uma saturação do elemento sensor da placa fotovoltaica, isso durante o período de maior intensidade solar. Tal problema também foi verificado por Pasetti et al. (2014) que lançou *LDRs* (*Ligth Dependent Resistor*) para a medição da radiação solar. Tais componentes semicondutores, que apresentam variação da resistência elétrica em função da luz, têm

resposta espectral limitada, próxima à do olho humano, além de resposta não linear à variação da intensidade luminosa e, finalmente, saturação em torno de 700 W/m. Esta situação inviabiliza a medição da irradiação solar na região do nordeste brasileiro, que tem índices superiores a 800 W/m<sup>2</sup> (PORFIRIO; CEBALLOS, 2017).

Para solucionar esse problema, foi colocada sobre a célula solar de silício uma placa opaca perfurada com múltiplos furos de diâmetro de 2 mm, espaçados entre si em 1 mm. A placa perfurada sobreposta à célula fotovoltaica realizou um pequeno sombreamento e possibilitou que a PV fosse capaz de medir irradiações superiores a 800 W/m. A ação da placa sólida perfurada foi de atenuar, sem modificar o espectro solar. O mesmo efeito poderia ter sido alcançado por um anteparo contínuo ou filme semitransparente; entretanto a possibilidade de mudança no espectro luminoso do que chega à superfície da célula solar deve ser considerada.

Para a calibração e validação do sensor proposto neste trabalho, foram comparadas suas medições com os valores de irradiância fornecidas pelo piranômetro CMP 3 da Kipp & Zonen, pré-calibrado. O tempo de amostragem de dados de intensidade luminosa foi de aproximadamente 10 segundos, em função da capacidade de processamento do microcontrolador utilizado. A Figura 5 ilustra as curvas obtidas por ambos os instrumentos após a aplicação de um filtro de média móvel, os dados foram coletados em 27 de julho de 2018, para um céu com poucas nuvens.

**Figura 5 – Irradiância medida pelo piranômetro Kipp and Zonnen e célula fotovoltaica de silício cristalino.**



Fonte: acervo dos autores.

Para a análise por comparação foram utilizados alguns índices estatísticos como: o desvio padrão (DP), desvio padrão relativo

(DPR), raiz do erro médio quadrático (REM<sub>Q</sub>), o erro médio absoluto em porcentagem (EMAP) e discrepância relativa (DR).

$$DPR (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_r} (y_r(k) - y_m(k))^2}{N_r}} \cdot \frac{100}{\bar{y}} \quad (9)$$

$$REM_Q = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_r} \left(\frac{y_r(k) - y_m(k)}{y_r(k)}\right)^2}{N_r}} \quad (10)$$

$$EMAP = \frac{100}{N_r} \sum_{k=1}^{N_r} \left| \frac{y_r(k) - y_m(k)}{y_r(k)} \right| \quad (11)$$

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_r} (y_r(k) - y_m(k))^2}{N_r}} \quad (12)$$

$$DR (\%) = \sum_{k=1}^{N_r} \left| \frac{y_r(k) - y_m(k)}{y_m(k)} \right| \cdot 100 \quad (13)$$

Onde,  $y_r$  é o valor real medido pela placa,  $y_m$  é o valor real medido pelo piranômetro,  $\bar{y}$  é o valor mais provável  $y_m$  e  $N_r$  é o número de amostras.

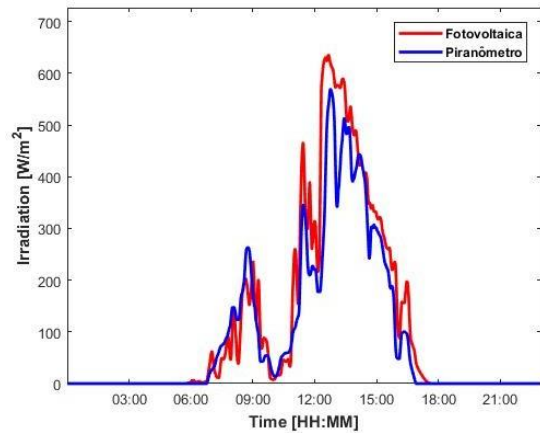
**Tabela 1 – Índices para um dia claro entre Placa x Piranometro.**

Índices	Resultados
REM <sub>Q</sub>	0.33
EMAP	15.82
DP	32.75
Discrepância absoluta máxima	86.10 W/m <sup>2</sup>
DR	1.19 %

Fonte: elaborada pelos autores.

A Figura 5 ilustra a real possibilidade da substituição do piranômetro comercial pela placa fotovoltaica na situação de um dia de céu claro. Porém, para validar o instrumento proposto para as mais diversas condições, foi realizado um novo teste em 04 de agosto de 2018 com céu nublado, principalmente durante a manhã, como mostra a Figura 6.

**Figura 6 – Irradiância medida pelo piranômetro Kipp and Zonnen e célula fotovoltaica de silício cristalino em um dia nublado.**



Fonte: acervo dos autores.

**Tabela 2 – Índices para um dia nublado entre Placa x Piranometro.**

Índices	Resultados
REM <sub>Q</sub>	0.47
EMAP	18.57
DP	52.76
Discrepância absoluta máxima	139.51 W/m <sup>2</sup>
DR	9.22 %

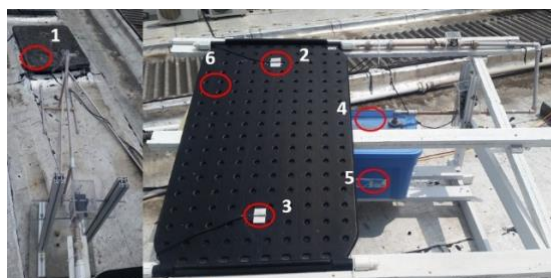
Fonte: elaborada pelos autores.

Outro dispositivo desenvolvido, também para limitar o custo final da planta, foi a válvula de controle proporcional de vazão. Conforme Lima et al. (2017), válvulas de controle são amplamente utilizadas em ambientes industriais para controle de vazão, porém seus valores, por muitas vezes, inviabilizam o uso desse tipo de equipamento em plantas de menor escala, como é o caso das plantas didáticas. A válvula desenvolvida faz uso de um servo motor Track Star TS-700 MG capaz de desenvolver um torque de 2.72 Nm em 4.8 V e até 3.3 Nm em 6.0 V. Além disso, este dispositivo é rápido, com resposta angular entre 5.3 rad/s e 5.8 rad/s, quando alimentado por 4.8 e 6.0 V respectivamente. O motor foi acoplado a uma válvula manual esférica de 20 mm, com abertura entre 0 e 90°, usando peças de acoplamento mecânico impressas em impressoras 3-D (Lima et al., 2017). Seu controle é realizado por sinais PWM (*Pulse Width Modulation*), gerados pelo microcontrolador que também permite a aquisição dos dados da planta proposta.

**Figura 7 – Válvula de Controle.**

Fonte: acervo dos autores.

Para o sensoriamento das temperaturas pertinentes ao processo foram utilizados os sensores digitais DS18B20. A figura 8 exhibe o posicionamento de alguns desses sensores, tais como: o sensor 1 (localizado dentro do tanque do fluido de entrada), os sensores 2 e 3 (presos à superfície do coletor em sua parte superior e inferior, respectivamente), o sensor 4 (utilizado para medir a temperatura do fluido de saída, acondicionado dentro do tanque), o sensor 5 (que capta o valor da temperatura do líquido armazenado no tanque quente) e, por fim, o sensor 6 (utilizado para a medição da temperatura ambiente, fixado na estrutura atrás do coletor). Este sensor digital é de fácil manipulação e tem resolução entre 9 e 12 bits, com faixa de atuação entre -10C e +85C e precisão de 0.5C.

**Figura 8 – Localização dos sensores de temperatura.**

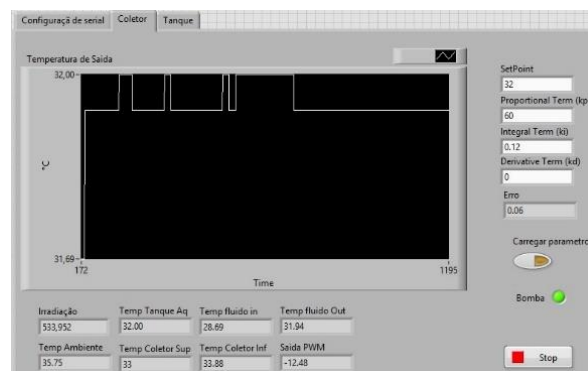
Fonte: acervo dos autores.

Foi implementado o sensoriamento do nível do tanque de saída, usando um sensor ultrassônico HC-SR04 para se evitar transbordamentos e desperdícios de água,

possibilitando assim o controle de nível do tanque e o intertravamento da planta. Utilizou-se também um medidor visual para a rápida identificação do nível pelo operador, isso para simular o caso industrial. A bomba utilizada foi a Seaflo 500 Gph, cuja tensão e capacidade são respectivamente 12 Vdc e 31 L/min. Para medição de vazão foi utilizado o sensor de efeito hall, YF-201, capaz de medir entre 1 – 30 L/min, enviando essa informação na forma de sinal digital, com precisão de 10% do valor medido.

## Supervisório

Um dos principais objetivos deste trabalho é fazer com que a planta didática represente ao máximo um processo industrial. A partir desse ponto de vista foi desenvolvido um supervisório em *Labview* que consegue monitorar de forma completa a planta termosolar. O *Labview* é um *software* de engenharia utilizado como plataforma de aquisição de dados em tempo real, controle de processos e ensino de engenharia. Nesta plataforma é fácil criar interfaces homem máquina, uma vez que se conta com um modelo de programação gráfica, que ajuda o programador no desenvolvimento e correção da aplicação que está sendo implementada, além de permitir uma rápida configuração do *hardware*. O supervisório desenvolvido comunica-se com o Arduino através da comunicação serial (NI, 2018).

**Figura 9 – Tela do Supervisório, para monitoramento da temperatura de saída do fluido.**

Fonte: acervo dos autores.

O programa desenvolvido permite ao usuário interagir com a planta. Nele podem ser alterados os parâmetros do controlador e o *setpoint*, além de tornar possível monitorar variáveis do processo; como vazão e nível do tanque quente, contando ainda com uma interface gráfica para o acompanhamento da temperatura de saída do coletor (ver figura 9).

## MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO

Um dos maiores desafios em controle de plantas solares é manter o *setpoint* da temperatura de saída. Isso se deve ao alto grau de não linearidade do processo e da impossibilidade da atuação sobre algumas variáveis; a exemplo da irradiância solar ou da temperatura ambiente (CAMACHO et al., 2012). Portanto torna-se ainda mais importante uma boa representação da dinâmica do coletor. O estudo de modelos matemáticos para coletores solares é algo bem difundido na literatura, tendo sido estudado por diversos autores como CARMONA (1985), AISA e IQBAL (2016), GALLEGO e CAMACHO (2012). A modelagem fenomenológica do coletor solar estudado é feita na forma de modelo distribuído como proposto para a planta ACUREX, apresentado por CAMACHO et al. (2012), ALSHARKAWI e ROSSITER (2017).

A dinâmica de um coletor solar pode ser representada através das seguintes equações diferenciais:

$$\begin{aligned} \rho_m C_m A_m \partial T_m / \partial t &= n_o G I - D_o \pi H_i (T_m - T_a) - D_i \pi H_t (T_m - T_f) \\ \rho_f C_f A_f \partial T_f / \partial t + p_f C_f q \partial T_f / \partial x &= D_i \pi H_t (T_m - T_f) \end{aligned} \quad (14)$$

Onde os subíndices *m* e *f* fazem referência ao metal e ao fluido, respectivamente, cujos parâmetros estão descritos na Tabela 3.

**Tabela 3 – Variáveis e parâmetros utilizados para a modelagem do processo.**

Símbolo	Descrição	Unidade
$\rho$	Densidade	$Kg/m^3$
$C$	Capacidade específica de aquecimento	$J/Kg^{\circ}C$
$A$	Área da secção transversal	$m^2$

$T$	Temperatura	$^{\circ}C$
$t$	Tempo	$s$
$I$	Irradiação solar	$W/m^2$
$n_o$	Eficiência ótica	$-$
$G$	Abertura ótica	$m$
$D_o$	Diâmetro externo do tubo	$m$
$H_i$	Coefficiente global de perda térmica	$W/m^{\circ}C$
$T_a$	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
$D_i$	Diâmetro interno do tubo	$m$
$H_t$	Coefficiente de transferência térmica metal fluido	$W/m^2^{\circ}C$
$q$	Vazão volumétrica	$m^3$
$x$	Espaço	$m$

Fonte: elaborada pelos autores.

O modelo de dinâmica da planta ACUREX baseia-se em coletores solares parabólicos (PTC), por onde circula um fluido específico para a transferência e transporte de calor. Neste trabalho, o coletor solar é feito em polietileno e o fluido utilizado é água. Na tabela 4 podem ser observados os parâmetros da planta.

**Tabela 4 – Valores dos parâmetros utilizados no modelo.**

Símbolo	Valor	Unidade
$\rho_m$	935	$Kg/m^3$
$C_m$	1850	$J/Kg^{\circ}C$
$A_m$	$0,45 \cdot 10^{-3}$	$m^2$
$n_o$	0,6	$-$
$G$	0,75	$m$
$D_o$	0,095	$m$
$A_f$	$0,45 \cdot 10^{-3}$	$m^2$
$\rho_f$	997	$Kg/m^3$
$C_f$	4186,80	$J/Kg^{\circ}C$
$A$	0,75	$m^2$

Fonte: elaborada pelos autores.

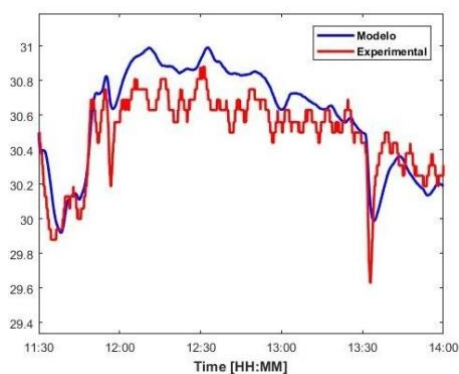
Segundo Alsharkawi e Rossiter (2017) é comum a prática de dividir-se o coletor em segmentos e avaliar o seu comportamento em cada faixa, já que este dispositivo apresenta comportamento não linear. Na literatura, a depender do tamanho (extensão/dimensão) da planta e suas vazões de operação, a maioria dos estudos utilizam uma quantidade de segmentos que variam entre 5 a 100. Utilizando esse princípio o coletor foi modelado para cinco faixas devido ao seu tamanho.



A validação do modelo foi feita pela comparação do resultado obtido por cálculo numérico com a resposta da planta construída. Para essa comparação foi utilizado o software Matlab/Simulink, essa plataforma permite, tanto uma programação em linhas de código, quanto a programação em diagrama de blocos, sendo possível um fácil diálogo entre ambas formas de programação.

Na tentativa de observar similitude entre o experimento e o modelo matemático foram utilizados os dados experimentais do dia 9 de agosto de 2018 como entradas do modelo proposto, seu comportamento pode ser visto na figura 10.

**Figura 10 – Resposta do modelo e do experimento no dia 09/08/18.**



Fonte: acervo dos autores.

**Tabela 5 – Índices estatísticos para avaliação do gráfico entre o modelo e a resposta experimental.**

Índices	Resultados
<i>REMQ</i>	0.54
<i>EMAP</i>	0.01
<i>DP</i>	0.16
<i>Discrepância absoluta máxima</i>	0.27 (°C)
<i>DPR</i>	0.44 %

Fonte: elaborada pelos autores.

Como podem ser observados na Tabela 5, os índices de validação utilizados demonstram uma boa similaridade entre as curvas exibidas na figura 10. Vale lembrar que os valores experimentais ilustrados estão sujeitos a erro de medição, devido à própria construção do sensor utilizado.

## ESTUDO DE CASO

Após a validação do modelo foi realizada uma identificação do processo, de forma a encontrar as funções de transferência que melhor representam a dinâmica do processo da planta termosolar, isso para cada faixa de operação. Isso foi necessário para o estudo de caso realizado com o controlador. A identificação foi realizada pelo *Software Matlab/Simulink*, que correlacionou as entradas medidas à temperatura de saída da água (que sai do coletor). Para isso, utilizou-se o modelo já validado. Cada entrada recebeu um sinal *pseudo random binary signal* (PRBS) com variação de 10% do valor do estado estacionário. A aplicação desse sinal ocorreu de forma sequencial, em que se aplicou o PRBS em uma das entradas por vez, mantendo as outras em regime estacionário. As equações encontradas estão exibidas na Tabela 6, sendo seguidas pela função de transferência geral.

**Tabela 6 – Equações identificadas.**

Temperatura Ambiente	Irradiação
$\frac{0.28064}{(1 + 18.832s)(1 + 20.398s)}$	$\frac{0.0029}{(1 + 19.225s)(1 + 19.07s)} e^{-0.738s}$
Vazão	Temperatura do fluido na entrada
$\frac{-33237}{(1 + 37.944s)} e^{-0.271s}$	$\frac{0.65179}{(1 + 16.3s)(1 + 17.891s)} e^{-10.097s}$

Fonte: elaborada pelos autores.

$$TF(s) = G1(s)Ta(s) + G2(s)I(s) + G3(s)Q(s) + G4(s)Te(s)$$

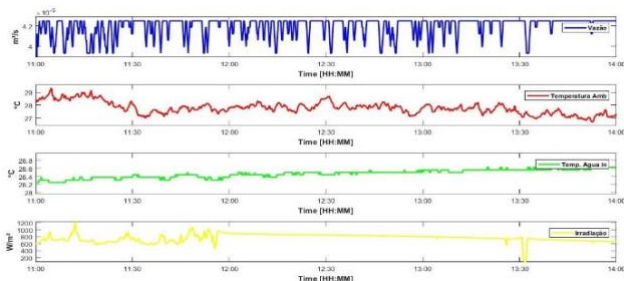
$$TF(s) = \frac{0.28064}{(1 + 18.832s)(1 + 20.398s)} * Ta(s) + \frac{0.0029}{(1 + 19.225s)(1 + 19.07s)} e^{-0.738s} + \frac{-33237}{(1 + 37.944s)} e^{-0.271s} * Q(s) + \frac{0.65179}{(1 + 16.3s)(1 + 17.891s)} e^{-10.097s}$$

Na Figura 11 são apresentadas as entradas, obtidas experimentalmente, que serviram para alimentar as equações identificadas e o modelo fenomenológico. As entradas são a vazão, a temperatura ambiente, a temperatura inicial da água e a irradiância solar.

Na Figura 12 são exibidas as temperaturas de saída do fluido para o modelo

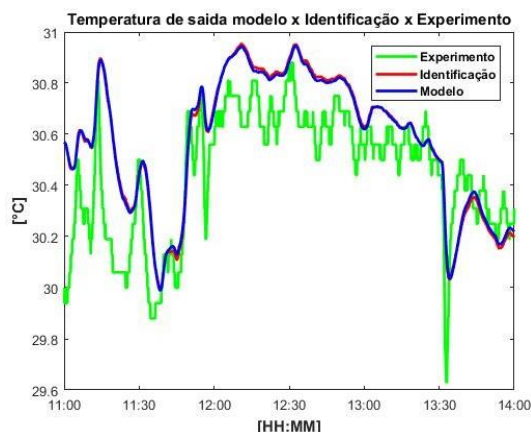
não linear, para as equações identificadas e a temperatura medida na saída da plana termosolar.

**Figura 11 – Entradas reais dia 09/08/18.**



Fonte: acervo dos autores.

**Figura 12 – Resposta do modelo, identificação e experimento, dia 09/08/18.**



Fonte: acervo dos autores.

**Tabela 7 – Índices estatísticos para avaliação do gráfico entre a identificação e o modelo**

Índice	Resultado
REMQ	0.04
EMAP	0.01
DP	0.01
Discrepância absoluta máxima	0.03 °C
DPR	0.03 %

Fonte: elaborada pelos autores.

**Tabela 8 – Índices estatísticos para avaliação do gráfico entre a identificação e o experimento**

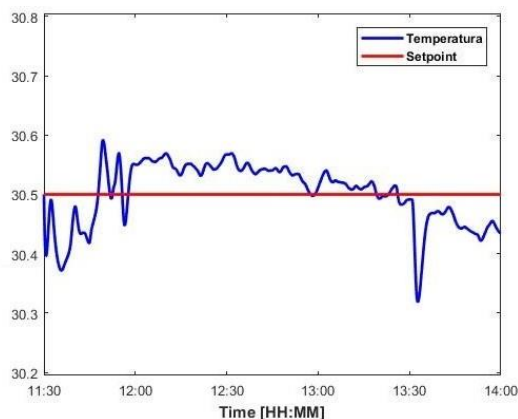
Índice	Resultado
REMQ	0.69
EMAP	0.01
DP	0.28
Discrepância absoluta máxima	0.03 °C
DPR	0.21 %

Fonte: elaborada pelos autores.

Observando-se as Tabelas 7 e 8 é possível perceber que as identificações propostas representam de forma quase fiel o comportamento do modelo fenomenológico proposto. Isto serve de embasamento para a validação das equações desenvolvidas.

Baseando-se nas equações de transferência encontradas foi proposta uma sintonia de controle IMC (*Internal Model Control*) sugerida por Rivera, Morari e Skogestad (1986), em que os valores das ações proporcional ( $K_p$ ), Integral ( $K_i$ ) e derivativo ( $K_d$ ) são respectivamente -60, 1,22 e 0. Foram usados dados de entrada do dia 9 de agosto de 2018 e aplicado o controlador PI proposto, a Figura 13 ilustra a resposta da simulação da temperatura de saída comparada com o *setpoint*.

**Figura 13 – Gráfico da resposta do controle aplicado ao modelo não linear e o *setpoint*, dia 09/08/18.**



Fonte: acervo dos autores.

**Tabela 9 – Índices estatísticos para avaliação do gráfico entre a temperatura de saída experimental e o *setpoint*.**

Índice	Resultado
REMQ	0.33
EMAP	0.01
DP	0.10
Discrepância absoluta máxima	0.31 °C
DPR	0.24 %

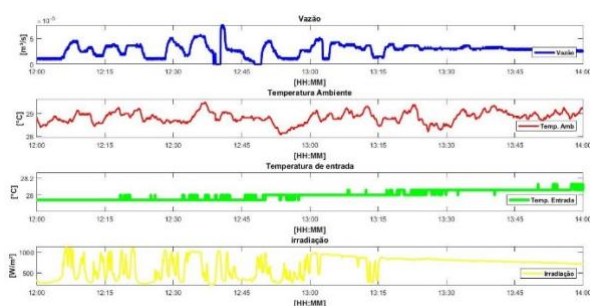
Fonte: elaborada pelos autores.

Com base nos dados ilustrados na Figura 13, percebe-se a boa precisão do controlador,

que manteve uma discrepância máxima entre o *setpoint* e a variável controlada inferior a 0.2%. Apesar da aceitável performance da ação de controle, o erro observado se deve à precisão dos sensores utilizados e das intempéries, as quais estão sujeitas à planta. Estas variáveis acidentais não foram consideradas no modelo utilizado para o projeto de controle.

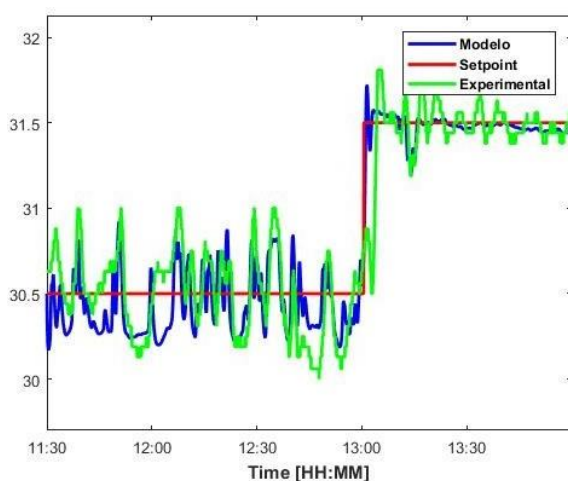
No dia 18 de setembro de 2018 foi realizado um teste experimental com o controlador PI, as figuras 15 e 16 exibem as entradas e o resultado da saída da planta, respectivamente, além do modelo não linear e do *setpoint*.

**Figura 14 – Entradas do dia 18/09/18.**



Fonte: acervo dos autores.

**Figura 15 – Resposta do controle, dia 18/09/18.**



Fonte: acervo dos autores.

Para a análise de desempenho de controle foram utilizados os seguintes índices: integral do erro quadrado (ISE), integral do tempo multiplicado pelo quadrado do erro (ITSE), integral do tempo multiplicado pelo

valor absoluto do erro (ITAE) e a integral do valor absoluto do erro (IAE). Definidas como:

$$ISE - \int_0^T e^2 dt \quad (17)$$

$$IAE - \int_0^T |e| dt \quad (18)$$

$$ITAE - \int_0^T t |e| dt \quad (19)$$

$$ITSE - \int_0^T t e^2 dt \quad (20)$$

**Tabela 10 – Índices estatísticos para avaliação do desempenho do controlador.**

Critério	Modelo	Experimental
ISE	95.1532	200.88
IAE	4.8469e+05	2.0250e+05
ITAE	1.1399e+09	4.0981e+08
ITSE	6.0049e+08	1.1431e+09
DP	0.1572	0.22
Variância	0.0247	0.05

Fonte: elaborada pelos autores.

O resultado ilustrado na tabela 10 exibe um melhor desempenho para o modelo proposto em comparação com o que se observa experimentalmente, como pode ser visto pelos critérios ISE e nos valores de desvio-padrão. A maior semelhança entre a curva obtida pelo modelo não linear, tomando por referência o *setpoint*, já era esperada, uma vez que a simulação numérica não consegue computar todas as variáveis do processo real, além do fato de que o próprio controlador foi desenvolvido a partir do modelo adotado.

Apesar dos resultados numéricos serem mais consistentes que a resposta experimental, em relação ao *setpoint* imposto, este resultado confirma a possibilidade do controle da temperatura do fluido através do controle da vazão. Vale ressaltar que a capacidade do controlador atingir o *setpoint* é limitada pela capacidade da planta, que tem um intervalo de aproximadamente 5°C entre a temperatura de entrada e a temperatura de saída do coletor. Os valores observados em um dia de céu claro, no tocante à faixa de variação de temperatura, caem significativamente em um dia de pouca luminosidade.

Dentro dos limites de capacidade da planta o controle proposto mostrou-se eficiente

apesar de todas as dificuldades próprias a uma situação experimental. Estas dificuldades são: a resolução dos sensores e os efeitos ambientais não considerados no modelo. Isto demonstra a robustez do controlador proposto, que foi capaz de reagir de forma satisfatória aos erros de *setpoint*, mantendo este erro inferior a 0.2%.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas as várias etapas do desenvolvimento de uma planta didática termosolar, desde a sua construção até a sua aplicação, destacando a relevância desta plataforma no âmbito acadêmico para a formação de estudantes de engenharia. A utilização deste tipo de equipamento no ensino da engenharia permite que docentes possam fazer a conexão entre os conhecimentos teóricos e as situações enfrentadas na prática e em campo, de modo a melhor capacitar o corpo discente para o mercado de trabalho.

Foi desenvolvido um *software* supervisor com capacidade de monitoramento do processo, que possibilita intervenções por parte do usuário como: alteração dos ganhos do controlador e ajuste do *setpoint*. A plataforma desenvolvida em *Labview* cria um ambiente amigável e de forte interação entre o usuário e a planta.

Dois dispositivos tiveram que ser desenvolvidos no intuito de substituir aparelhos comerciais de custo elevado. Assim, a válvula de controle e o piranômetro construídos reduziram significativamente o custo final de construção da planta didática, além de terem apresentado performances compatíveis com os dispositivos comerciais, tanto nos teste de bancada quanto quando implantados na planta termosolar para exercer ação de controle.

A possibilidade do estudo da modelagem de sistemas não lineares foi demonstrada usando a planta proposta, uma vez que esta planta pode ser caracterizada como tal. A planta termosolar também possibilita o estudo de projetos de controle que exijam sintonias de controladores e mesmo a

implementação de controle avançado. Vale ressaltar que a planta didática desenvolvida se caracteriza por sua versatilidade e potenciais para novas aplicações, o que ainda resta a ser explorado em estudos futuros.

## REFERÊNCIAS

- AISA, A.; IQBAL, T. Modelling and simulation of a solar water heating system with thermal storage. **IEEE**, 2016.
- ALSHARKAWI, A.; ROSSITER, J. Modelling analysis of a solar thermal power plant. **IEEE**, 2017.
- BAHIR, L. E.; et al. Estimator of local solar irradiation based on a pv model. **Electrical and Information Technologies (ICEIT), 2015 International Conference on**, p. 178–183, 2015.
- BOZEMAN, B.; CORLEY, E. Scientists' collaboration strategies: implications for scientific and technical human capital. **Research Policy**, n. 33, p. 599–616, 2004.
- CAMACHO, E. et al. Control of solar energy systems. **Springer Verlag**, 2012.
- CARAYOL, N. Objectives, agreements and matching in science-industry collaborations: reassembling the pieces of the puzzle. **Research Policy** 32, p. 887–908, 2004.
- CARMONA, R. Analysis, modeling and control of a distributed solar collector field with a one-axis tracking system. **Spanish: University of Seville, Spain**, 1985.
- COSTA, M. V. A. da et al. Viability and application of ethanol production coupled with solar cooling. **Applied energy**, v. 102, p. 501–509, 2013.
- DUNN, L.; GOSTEIN, M.; EMERY, K. Comparison of pyranometers vs. pv reference cells for evaluation of pv array performance. **World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of**, v. 2, 2011.
- EPE. Plano nacional de energia 2030. 2007.
- FUENTES, C. D.; DUTRÉNIT, G. et al. Best channels of academia–industry interaction for long-term benefit. **Research Policy**, v. 41, n. 9, p. 1666–1682, 2012.
- GALLEGO, A. J.; CAMACHO, E. F. Adaptive state-space model predictive control of a parabolic-

trough field. *Control Engineering Practice*, v. 20, n. 9, p. 904–911, 2012.

GARCIA, R.; et al. Looking at both sides: how specific characteristics of academic research groups and firms affect the geographical distance of university–industry linkages. *Regional Studies, Regional Science*, v. 2, n. 1, p. 518–534, 2015.

GERARD et al. Modelling bond graph of a thermal solar water heater for thermal comfort in a building. *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe)*, p. 1–6, 2017.

INMETRO. Programa brasileiro de etiquetagem, sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água. [S.l.], 2008.

INTARAKUMNERD, P.; SCHILLER, M. University–industry linkages in thailand: successes, failures and lessons learned for other developing countries. *Globelics Conference*, 2009.

JENSEN, M. et al. Forms of knowledge and modes of innovation. *Research Policy*, n. 36, p. 680–693, 2007.

LEACH, F. et al. Didactic platform for the study of hybrid wind-hydro power plants. In: *8th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems Electric Drives Joint Symposium*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–6.

LIANG, Y.-f.; YANG, J.-c. Applications of three-dimensional cad in design of twin rollers sheet feeder. In: *IEEE. Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010 International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 528–531.

LIMA, M. et al. Cobem-2017-2320 development of a reduced scale plant for continuous industrial process simulation and fluid level control in communicating vessels. *International Congress of Mechanical Engineering*, 2017.

NI. *Labview*. <http://www.ni.com>, 2018.

PANDINI, M. M. et al. Design of a didactic workbench of industrial automation systems for engineering education. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 15, n. 8, p. 1384–1391, 2017.

PASETTI, G. O. et al. **Automação e otimização energética de uma unidade de aquecimento solar doméstica**, 2014.

PORFIRIO, A.; CEBALLOS, J. A method for estimating direct normal irradiation from geostationary satellite imagery: Validation and application over northeast brazil. *Solar Energy*, v. 155, p. 178–190, 2017.

RIBEIRO, J. M. de S. et al. Construção, modelagem e controle, através de clp, de uma planta didática do sistema pêndulo invertido, com utilização de software scada. In: *Proceedings of International Conference on Engineering and Technology Education*. [S.l.: s.n.], 2014. v. 13, p. 218–222.

RIVERA, D. E.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. Internal model control: Pid controller design. *Industrial & engineering chemistry process design and development*, ACS Publications, v. 25, n. 1, p. 252–265, 1986.

RIZZI, F. et al. Hybrid orc waste heat recovery system and solar thermal plant in ait baha, morocco. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 53, n. 1, p. 602–607, 2017.

SCOLARO, G. R. et al. Development of a didactic platform for acquisition and processing of biomedical signals for the practice in biomedical engineering. In: *9th International Conference on Electronic Measurement Instruments*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–1–1–4.

---

## DADOS DOS AUTORES



**Matheus Oliveira de Brito** é formado em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Federal da Bahia; mestrando em Engenharia Mecatrônica pela UFBA. Áreas de interesse: controle, modelagem e simulação de processos



**Marcus Vinicius Americano da Costa** possui graduação em Engenharia Elétrica com habilitação em eletrônica, mestrado em Engenharia Elétrica, doutorado, pós-doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas e pós-doutorado no Departamento de Engenharia Química e Biomédica da Universidade do Sul da Flórida, Estados Unidos. Atualmente, é Professor do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação. Trabalha em pesquisa e aplicação de controle e automação de processos.



**Iuri Muniz Pepe** é graduado em Física pela Universidade Federal da Bahia (1985), mestrado em Física da Matéria Condensada pelo IF-UFBA (1989), mestrado em Física Nuclear na Université Catholique de Louvain (1992) e doutorado em Física Nuclear na Université Catholique de Louvain (1995). Atualmente é professor Associado IV do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia. Tem expertise nas áreas: Física de semicondutores e Espectroscopia Ótica, Instrumentação Científica, Instrumentação para o Ensino de Física e Instrumentação Industrial, Sensores e Detectores.