



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ALEXANDRE ATÍLIO RAMOS DE ALENCAR FILHO**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA EFICIÊNCIA DE  
MÓDULO FOTOVOLTAICO SOBRE ESTRUTURA FLUTUANTE**

**FORTALEZA**

**2018**

ALEXANDRE ATÍLIO RAMOS DE ALENCAR FILHO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA EFICIÊNCIA DE  
MÓDULO FOTOVOLTAICO SOBRE ESTRUTURA FLUTUANTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, equipamentos e sistemas para energias renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A353a Alencar Filho, Alexandre Atílio Ramos de.  
Avaliação da influência da temperatura na eficiência de módulo fotovoltaico sobre estrutura flutuante. / Alexandre Atílio Ramos de Alencar Filho. – 2018.  
77 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

1. Módulo Fotovoltaico Flutuante. 2. Temperatura do módulo fotovoltaico. 3. Eficiência. I. Título.

CDD 620.1

---

ALEXANDRE ATÍLIO RAMOS DE ALENCAR FILHO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA EFICIÊNCIA DE  
MÓDULO FOTOVOLTAICO SOBRE ESTRUTURA FLUTUANTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, equipamentos e sistemas para energias renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Aprovada em: 27/07/2018

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Elissandro Monteiro do Sacramento  
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

A Deus.

Aos meus pais e toda minha família.

## AGRADECIMENTOS

A minha família, pelo apoio durante o período de formação, em especial ao meu avô Segisnando (*In Memoriam*), peça fundamental durante toda minha trajetória acadêmica.

Ao Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho, pela orientação e supervisão.

A todos os professores e servidores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFC.

Aos colegas do Laboratório de Energias Alternativas – LEA, pelas ajudas e sugestões.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”. (Albert Einstein)

“A persistência é o menor caminho do êxito”. (Charles Chaplin)

## RESUMO

A energia solar é considerada uma das alternativas energéticas mais promissoras na atualidade e sua aplicação em plantas fotovoltaicas (FV) tem crescido a nível mundial para geração de energia elétrica. Como fator limitante no processo de geração FV, elevadas temperaturas de operação dos módulos FV geram uma redução em suas eficiências de conversão energética. A partir desta motivação, a presente dissertação tem como objetivo avaliar a eficiência de módulos FV instalados sobre estruturas flutuantes em água em função do gradiente de temperatura pela troca de calor com o ambiente. Foram realizados dois experimentos no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA – UFC), com o uso de dois módulos FV policristalinos modelo KS20T de 20 Wp. Nas duas etapas um dos módulos ficou instalado sobre o solo e o segundo instalado sobre uma estrutura flutuante em um tanque com água. Na primeira etapa foi analisada a influência da distância entre o módulo FV flutuante e o espelho d'água sobre a temperatura dos painéis, alterando esta distância e coletando os dados de temperatura através de um controlador lógico programável (CLP), com uso de sensores de temperatura PT-100. Foram coletados dados para distâncias entre a água e o módulo FV de 7,5 cm, 6,0 cm, 4,5 cm e 3,0 cm. Na segunda etapa do experimento, foi proposto um flutuador de PVC para instalar o módulo FV e avaliada sua geração efetiva de energia elétrica. Após 30 dias de aquisição de dados foi possível constatar um ganho bruto médio de 5,09% de energia elétrica gerada a partir do módulo flutuante, comparando com o módulo sobre o solo. O módulo FV flutuante apresentou um ganho em relação ao módulo sobre o solo em 70% dos dias analisados, dos quais 66,67% foram dias que apresentaram valores de irradiação diária acima de 3,0 kWh/m<sup>2</sup>.

**Palavras-chave:** Módulo Fotovoltaico Flutuante, Temperatura do módulo fotovoltaico, Eficiência.



## ABSTRACT

Solar energy is considered one of the most promising energy alternatives today and its application in photovoltaic (PV) plants has grown worldwide to generate electricity. As a limiting factor in the PV generation process, high operating temperatures of the PV modules cause a reduction in their energy conversion efficiency. Using this motivation, this dissertation aims to evaluate the efficiency of PV modules installed on floating structures in water as a function of the temperature gradient by the heat exchange with the environment. Two experiments were carried out in the Alternative Energy Laboratory of the Federal University of Ceará (LEA - UFC), using two 20 Wp polycrystalline PV model KS20T modules. In the two phases of the experiment one of the modules was installed on the ground and the second one installed on a floating structure in a tank with water. In the first phase, the influence of the distance between the floating PV module and the water surface on the panel temperature was analyzed, changing this distance and collecting the temperature data through a programmable logic controller (PLC), using sensors temperature PT-100. Data were collected for distances between the water and the PV module of 7.5 cm, 6.0 cm, 4.5 cm and 3.0 cm. In the second stage of the experiment, a PVC float was proposed to install the PV module and evaluated its effective generation of electric energy. After 30 days of data acquisition it was possible to verify an average gross gain of 5.09% of electric power generated from the floating module, comparing with the module on the ground. The floating PV module presented a gain in relation to the ground module in 70% of the analyzed days, of which 66.67% were days that presented daily irradiance values above 3.0 kWh / m<sup>2</sup>.

**Keywords:** Floating Photovoltaic Module, Photovoltaic module temperature, Efficiency

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Projetos de painéis fotovoltaicos flutuantes no mundo. ....	16
Figura 1.2 – Usina FV flutuante de Rosana - SP. ....	17
Figura 2.1 – Investimentos em capacidade produtiva por tipo de fonte no período de 2012 a julho de 2016 no mundo .....	21
Figura 2.2 – Matriz energética elétrica do Brasil em 2016. ....	22
Figura 2.3 – Níveis de potencial de uma fonte geradora de energia. ....	23
Figura 2.4 – Média anual global de irradiação global horizontal no Brasil.....	25
Figura 2.5 – Instalações em solo.....	29
Figura 2.6 – Instalações em telhados.....	29
Figura 2.7 – Instalações sobre canais.....	30
Figura 2.8 – Instalações offshore. ....	31
Figura 2.9 – Instalações sobre estruturas flutuantes.....	32
Figura 2.10 – Curvas I-V de módulo FV em função de sua temperatura. ....	33
Figura 3.1 – Plantas instaladas pela Ciel & Terre no mundo. ....	37
Figura 3.2 – Plantas FV instaladas em fazenda (Goiás/Brasil). ....	39
Figura 3.3 – Plantas FV instaladas em fazenda (Goiás/Brasil). ....	40
Figura 4.1 – Módulo FV instalado sobre o solo. ....	42
Figura 4.2 – Módulo FV instalado sobre água.....	42
Figura 4.3 – Módulo FV instalado sobre estrutura de PVC. ....	43
Figura 4.4 – Módulo FV instalado sobre estrutura de PVC. ....	44
Figura 4.5 – Sensores PT-100. ....	45
Figura 4.6 – Termômetro infravermelho visual Fluke VT02.....	47
Figura 4.7 – Pirânometro Hukserflux LP02. ....	48
Figura 4.8 – Transmissores de temperatura NOVUS.....	49

Figura 4.9 – Sensores de tensão e corrente e módulo de comunicação Atos BRiO.....	50
Figura 4.10 – Carga utilizada (lâmpadas). ....	50
Figura 4.11 – Fluxograma do sistema de monitoramento. ....	51
Figura 4.12 – Tela do programa de monitoramento. ....	52
Figura 5.1 – Temperatura dos módulos FV (flutuante: 7,5 cm). ....	54
Figura 5.2 – Dados de irradiância e velocidade do vento (flutuante: 7,5 cm)...	54
Figura 5.3 – Temperatura dos módulos FV (flutuante: 6,0 cm). ....	55
Figura 5.4 – Dados de irradiância e velocidade do vento (flutuante: 6,0 cm)...	55
Figura 5.5 – Temperatura dos módulos FV (flutuante: 4,5 cm). ....	56
Figura 5.6 – Dados de irradiância e velocidade do vento (flutuante: 4,5 cm)...	56
Figura 5.7 – Temperatura dos módulos FV (flutuante: 3,0 cm). ....	57
Figura 5.8 – Dados de irradiância e velocidade do vento (flutuante: 3,0 cm)...	57
Figura 5.9 – Dados de geração de eletricidade e Irradiação.....	59
Figura 5.10 – Comparativo percentual de geração de eletricidade. ....	60
Figura 5.11 – Irradiância e potência instantânea (28/03/2018). ....	61
Figura 5.12 – Irradiância e potência instantânea (04/04/2018). ....	62
Figura 5.13 – Temperatura dos módulos FV (17/11/2017).....	64
Figura 5.14 – Temperatura dos módulos FV (18/11/2017).....	64
Figura 5.15 – Temperatura dos módulos FV (13/04/2018).....	65
Figura 5.16 – Temperatura dos módulos FV (21/04/2018).....	65
Figura 5.17 – Temperatura ambiente dias 17/11/2017 e 03/04/2018.....	66
Figura 5.18 – Temperatura ambiente dias 18/11/2017 e 21/04/2018.....	66
Figura 5.19 – Dados de irradiância dias 17/11/2017 e 03/04/2018. ....	66
Figura 5.20 – Dados de irradiância dias 18/11/2017 e 21/04/2018. ....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Empreendimentos (potência instalada em operação) .....	24
Tabela 2.2 – Empreendimentos (potência em construção) .....	24
Tabela 2.1 – Correlações da eficiência de painéis FV em função da temperatura. ....	34
Tabela 3.1 – Setenta maiores plantas FV flutuantes do mundo em potência instalada por país e fabricante. ....	36
Tabela 3.2 – Potência instalada das 70 maiores plantas FV flutuantes do mundo por fabricante.....	37
Tabela 4.1 – Especificações do módulo FV modelo Kyocera KS20T.....	41
Tabela 4.3 – Custo total dos componentes do flutuador. ....	43
Tabela 4.4 – Especificações da Câmera Térmica VT02. ....	47
Tabela 4.5 – Especificações do piranômetro LP02. ....	48
Tabela 5.1 – Resultados primeira etapa.....	58
Tabela 5.2 – Variação de eficiência e irradiação.....	60
Tabela 5.3 – Comparativo primeira e segunda etapas – Temperatura. ....	62
Tabela 5.4 – Comparativo primeira e segunda etapas – Eficiência. ....	63

## LISTA DE SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
CERNE	Centro de estratégias em recursos naturais e energia
CRESESB	Centro de Referência para a Energia Eolar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CLP	Controladores lógicos programáveis
EPE	Empresa de pesquisa energética
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
FPV	Floating photovoltaic systems
FV	Fotovoltaico(a)
GW	Gigawatts
IEA	International Energy Agency
UFV	Usina fotovoltaica
Wp	Watt-pico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1.1</b>	<b><i>Objetivo geral .....</i></b>	<b>18</b>
<b>1.1.2</b>	<b><i>Objetivos específicos.....</i></b>	<b>18</b>
<b>1.2</b>	<b>Estrutura do projeto .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>PANORAMA ENERGÉTICO.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Panorama energético brasileiro.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.1</b>	<b><i>Panorama brasileiro de geração FV .....</i></b>	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Energia solar.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.1</b>	<b><i>Sistemas FV.....</i></b>	<b>26</b>
<b>2.3</b>	<b>Geração FV .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4</b>	<b>Instalações de sistemas FV.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.1</b>	<b><i>Instalações em solo .....</i></b>	<b>28</b>
<b>2.4.2</b>	<b><i>Instalações em telhados.....</i></b>	<b>29</b>
<b>2.4.3</b>	<b><i>Instalações sobre canais .....</i></b>	<b>30</b>
<b>2.4.4</b>	<b><i>Plantas offshore .....</i></b>	<b>30</b>
<b>2.4.5</b>	<b><i>Instalações sobre estruturas flutuantes.....</i></b>	<b>31</b>
<b>2.5</b>	<b>Comportamento térmico e eficiência dos módulos FV.....</b>	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>EXPERIÊNCIAS DE PLANTAS FV FLUTUANTES .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Projetos no mundo.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>Projetos no Brasil.....</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Módulo FV utilizado .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.1</b>	<b><i>Primeira etapa.....</i></b>	<b>41</b>

<b>4.1.2</b>	<b>Segunda etapa.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2</b>	<b>Sensores .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Sensores de temperatura .....</b>	<b>45</b>
4.2.1.1	<i>Calibração dos sensores de temperatura.....</i>	46
<b>4.2.2</b>	<b>Piranômetro .....</b>	<b>48</b>
<b>4.3</b>	<b>Sistema de monitoramento e aquisição de dados .....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>68</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>77</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O uso da energia solar como fonte de produção de eletricidade é relativamente recente. Devido seu alto potencial de aproveitamento, esse tipo de produção de energia elétrica ganhou destaque como alternativa de suprimento elétrico (TOLMASQUIM, 2016).

O Brasil possui elevado índice de irradiação solar quando comparado a países europeus e asiáticos e Estados Unidos, onde a tecnologia fotovoltaica (FV) para produção de energia elétrica já é mais disseminada (CRESESB, 2014; CAZAZNINGA, 2017). Os valores de irradiação solar incidente em qualquer região do território brasileiro (1500-2500 kWh/m<sup>2</sup>) são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como Alemanha (900-1250 kWh/m<sup>2</sup>), França (900-1650 kWh/m<sup>2</sup>) e Espanha (1200-1850 kWh/m<sup>2</sup>), onde projetos para aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais são amplamente disseminados (PEREIRA *et al.*, 2006), o que corrobora os custos elevados para o uso da tecnologia no Brasil.

Os custos estimados para implantação de sistemas FV no Brasil vêm sendo reduzidos de R\$ 7,70 / Wp em 2012 a projeções de R\$ 4,10 / Wp para o ano de 2023 (EPE – Empresa de pesquisa energética, 2014).

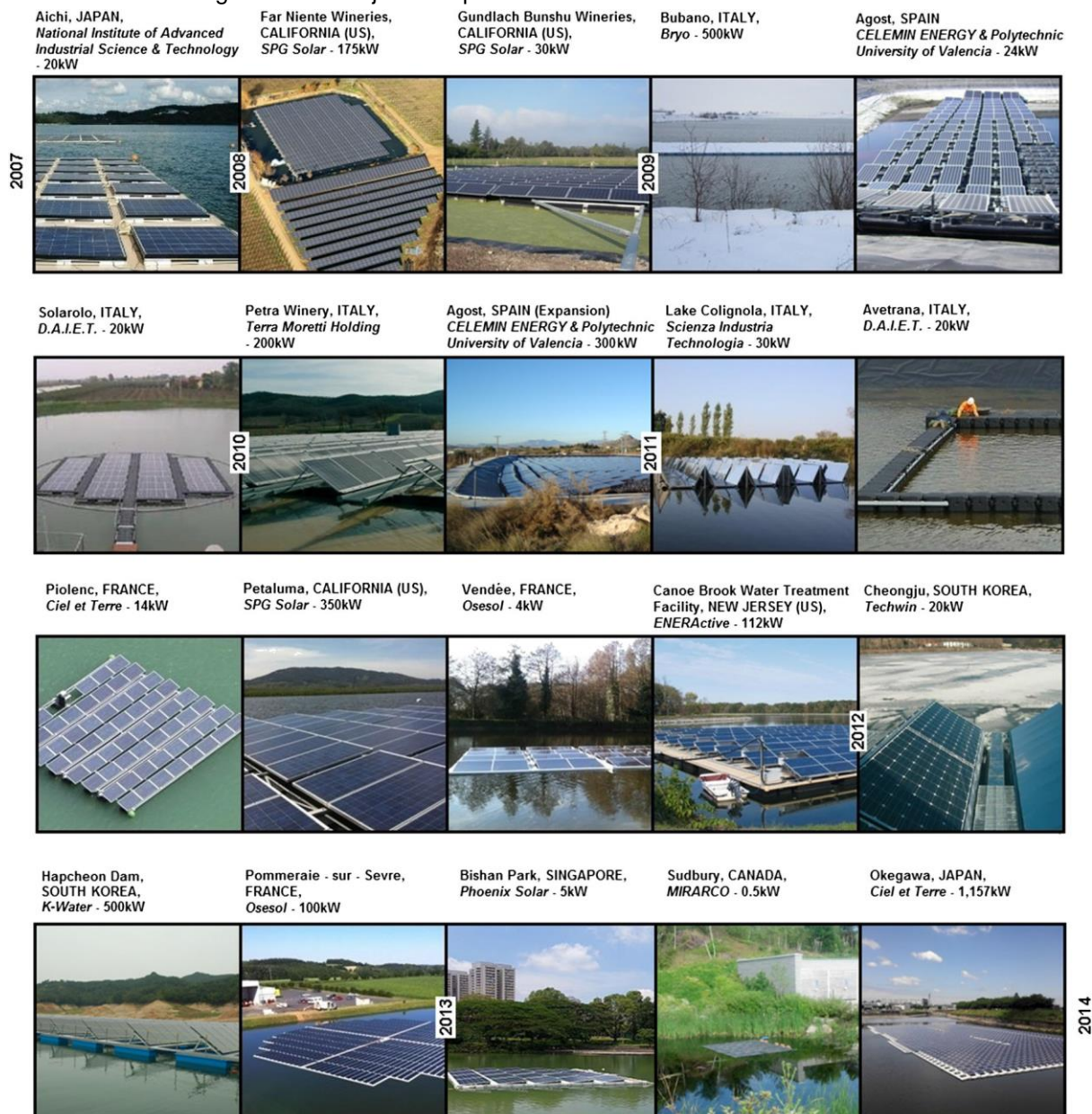
À medida que a tecnologia FV está se torna mais barata, acessível e presente ao redor do mundo, novas tecnologias e métodos de instalação estão emergindo. Especificamente, os painéis FV flutuantes estão se tornando um nicho competitivo e viável no mercado, uma vez que sua instalação em corpos d'água oferece uma alternativa à instalação tradicional em áreas secas, tais como solo ou telhados.

Desde 2007 diversas experiências em implantação de usinas FV vêm se desenvolvendo no setor cujos painéis são montados de forma flutuante em reservatórios de barragens e de lagos naturais, como visto na Figura 1.1 (TRAPANI e SANTAFÉ, 2015; GALDINO e OLIVIERI, 2017), como maneira de quebrar paradigmas de que instalações de painéis em superfícies aquáticas são processos caros e complicados, devido a necessidade de aquisição de



estruturas específicas para a montagem dos painéis sobre corpos d'água, como foi reportado pela IEA no seu relatório anual em 2014 (CAZZANIGA, 2017).

Figura 1.1 – Projetos de painéis fotovoltaicos flutuantes no mundo.



Fonte: TRAPANI e SANTAFÉ, 2015

A tecnologia dos sistemas FV flutuantes está se difundindo ao redor do globo aliada a pesquisas que comprovem sua vantagem em relação aos sistemas FV instalados sobre o solo (CAZZANIGA, 2017). Vantagens tais como o resfriamento evaporativo provocado nos painéis FV e cabos pela presença do corpo d'água, a redução da evaporação da superfície livre da água, preservando

o volume de água armazenada e também a redução da formação de ondas e, assim, a erosão das margens do reservatório. Um sistema FV flutuante instalado no reservatório de uma usina hidrelétrica (UHE) permite economizar água e não necessita de investimentos em transmissão pois a infraestrutura existente pode ser compartilhada naquele reservatório, substituindo parte de sua geração a eficiência do sistema (GALDINO e OLIVIERI, 2017).

No Brasil, os primeiros projetos de plantas FV flutuantes, iniciados em 2015 foram anunciados para os lagos das UHE de Sobradinho (BA) e Balbina (AM) (GALDINO e OLIVIERI, 2017). Já a primeira usina FV que utiliza a tecnologia de placas flexíveis e rígidas em sistema flutuante em plena operação fica na cidade de Rosana, em São Paulo, gerando 101.522 kWh. (SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO – SÃO PAULO, 2016). A usina FV flutuante de Rosana é apresentada na Figura 1.2.

Figura 1.2 – Usina FV flutuante de Rosana - SP.



Fonte: SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO – SÃO PAULO, 2016

A motivação do presente trabalho veio a partir de duas pesquisas realizadas anteriormente no Laboratório de Energias Alternativas – Universidade Federal do Ceará (LEA – UFC).

a. Do Sacramento (2015), onde foi verificado o comportamento elétrico-térmico do módulo FV instalado em uma estrutura flutuante de modo que esse ficava com a parte traseira em contato com a água. Foi apresentado um ganho médio de geração de 9% do módulo FV flutuante em comparação ao convencional..

b. Corrêa (2015), onde foi comparada a eficiência do módulo FV instalado em uma estrutura flutuante de modo que esse ficava com as partes posterior e traseira em contato com a água e um módulo FV instalado em solo. Foi apresentado um ganho médio de geração de 8,78% do módulo FV flutuante em comparação ao convencional.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 *Objetivo geral***

Avaliar eficiência do módulo FV flutuante e compara-la a um módulo de mesma especificação instalado sobre o solo.

### **1.1.2 *Objetivos específicos***

- a) Verificar o efeito do gradiente de temperatura entre módulo e ambiente.
- b) Analisar a eficiência do módulo FV instalado sobre a estrutura flutuante devido ao gradiente de temperatura pela troca de calor com o ambiente.
- c) Avaliar a relação entre a distância do módulo ao espelho d'água e o gradiente de temperatura entre o módulo FV flutuante e módulo instalado sobre o solo.

- d) Validar modelos matemáticos que correlacionam a temperatura do módulo FV e sua eficiência.

## **1.2 Estrutura do projeto**

A presente dissertação está estruturada em 6 capítulos. O primeiro contém uma introdução, revelando a motivação e os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada uma introdução teórica acerca do panorama energético brasileiro e energia solar FV, mostrando instalações de diferentes tipos, focando no tipo de instalação de sistemas FV sobre estruturas flutuantes.

No capítulo 3 é descrito o estado da arte em relação ao uso da configuração flutuante de módulos FV, sendo realizada uma revisão bibliográfica dos projetos e pesquisas desenvolvidas no meio.

No capítulo 4 são descritas as etapas da pesquisa e como se deram as aquisições de dados, bem como os dispositivos utilizados.

No capítulo 5, os resultados da pesquisa são apresentados junto às discussões pertinentes.

Como parte final do trabalho de dissertação, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. PANORAMA ENERGÉTICO

A energia é um elemento indispensável de entrada na produção durante o desenvolvimento econômico de uma nação. Sem um fornecimento adequado e constante de energia, o avanço econômico é gravemente afetado (KO *et al.*, 2015). Devido ao desenvolvimento tecnológico e econômico, a sociedade vislumbra constantemente a necessidade de proporcionar um ambiente com melhor qualidade de vida ao ser humano, logo, inevitavelmente gera o aumento da demanda por energia (SAMPAIO *et al.*, 2017).

Tendo como perspectiva o panorama ambiental atual, a geração de energia elétrica acarreta em impactos para o meio ambiente, se tomado como parâmetro os meios convencionais de geração. Impactos esses associados ao uso de combustíveis fósseis (LEE, 2014). Partindo dessa premissa, o desenvolvimento e pesquisas no setor energético, especificamente de geração utilizando fontes renováveis, está em plena ascensão nos últimos anos.

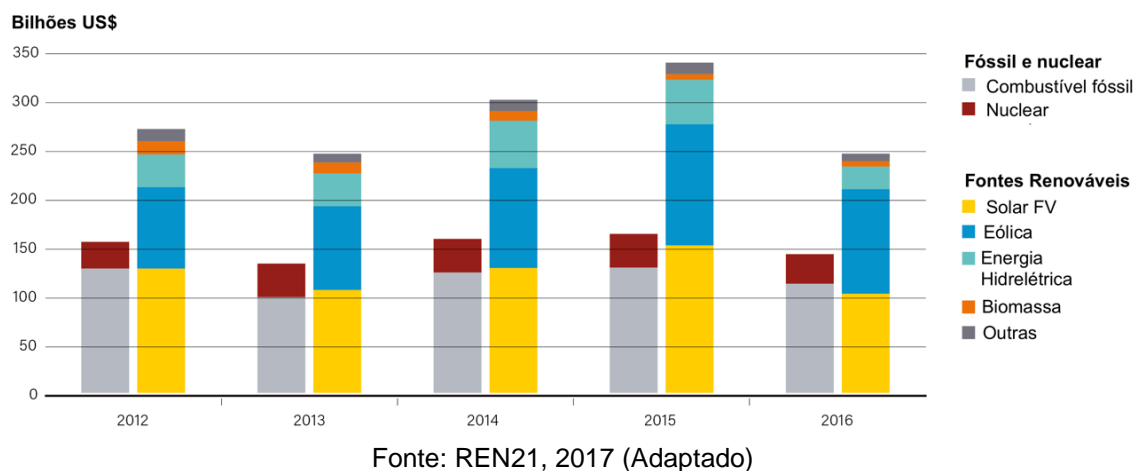
As fontes de energia renováveis estão sendo altamente fundidas nos sistemas de energia, podendo ser encontradas nos mais diversos ambientes e em variados tipos de projetos, podendo ser vistas em uma enorme usina de energia centralizada ou até mesmo através de uma planta geração distribuída perto dos usuários finais (TALARI *et al.*, 2017).

Por ser um meio alternativo de geração, a importância das fontes de energia renováveis vem crescendo. Dentre as fontes renováveis de energia, as duas que vêm se destacando são, energia solar e energia eólica (LEE, 2104). É possível notar esse avanço na Figura 2.1, onde são apresentados os investimentos em capacidade produtiva por fontes fóssil, nuclear e renováveis no período de 2012 a julho de 2016 no mundo.

Levantamentos realizados pela EPIA, *European Photovoltaic Industry Association*, em 2014, utilizando 2013 como ano base, mostraram que a capacidade instalada mundialmente da geração FV atingiu valores próximos a 139 GWp, sendo 38 GWp instalados no ano base do estudo. Isso demonstrou uma rápida expansão do setor, gerando assim uma redução de custos, e essa

retroalimentação produtiva estimula o crescimento da capacidade instalada (EPE, 2014).

Figura 2.1 – Investimentos em capacidade produtiva por tipo de fonte no período de 2012 a julho de 2016 no mundo

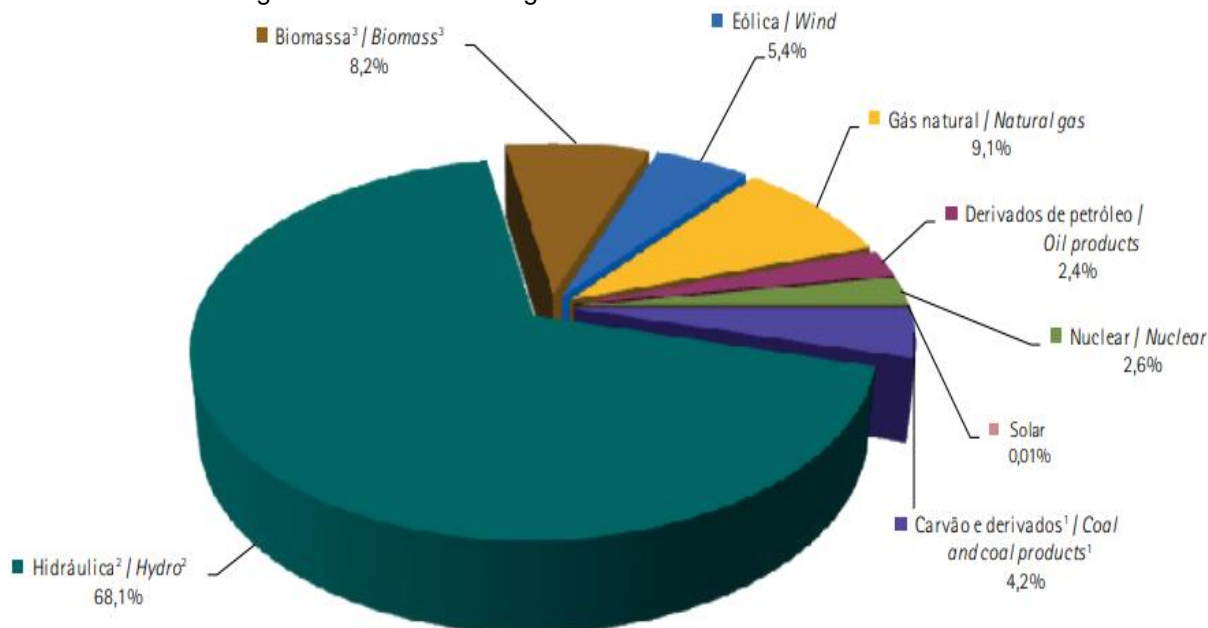


## 2.1 Panorama energético brasileiro

O governo brasileiro vem desenvolvendo políticas com o intuito de diversificar a matriz geradora de energia elétrica do país por motivos econômicos, geográficos e ambientais. Essa diversificação toma como meio a descentralização de plantas geradoras de energia elétrica, principalmente utilizando fontes eólica e solar (DO SACRAMENTO *et al.*, 2015). Atualmente a principal fonte de energia elétrica do país é a hidrelétrica, como pode ser visto na Figura 2.2, que mostra a matriz de energia elétrica do Brasil em 2016 (FERREIRA, *et al.* 2018).

É indiscutível que o país possui considerável capacidade para geração de energia elétrica, e sua diversidade permite a expansão da sua matriz energética por uso de fontes renováveis. O desenvolvimento de tecnologias e incentivos para o uso desse tipo de fonte acarretará indubitavelmente na colocação do Brasil entre os líderes mundiais de geração de energia elétrica por meio de fontes limpas de energia (GERRA *et al.*, 2014).

Figura 2.2 – Matriz energética elétrica do Brasil em 2016.



Fonte: EPE, 2017.

De acordo com dados da Agência Internacional de Energia e das principais estatísticas energéticas mundiais, o Brasil, a Rússia, a Índia e a China representam 32% da demanda mundial de energia, dentro desse valor, o Brasil representa 2% da demanda energética mundial (FERREIRA *et al.*, 2018).

No Brasil há uma previsão de expansão de cerca de 41 GW na capacidade instalada de geração de energia elétrica até 2026, com predomínio das usinas eólicas e solares, que deverão responder por quase 19 GW no período, segundo o cenário de referência de um estudo do governo (CERNE, 2017).

Os investimentos no setor chegarão à cerca de R\$ 12,5 bilhões em geração solar até o fim de 2018, valor projetado pela Associação Brasileira de Energia Solar FV (ABSOLAR), considerando os parques FV contratados em leilões nos últimos anos e que deverão entrar em operação até o fim de 2018 (CERNE, 2017).

### 2.1.1 Panorama brasileiro de geração FV

Assim como qualquer fonte energética, o potencial de geração FV é classificado em níveis: recurso, potencial técnico, econômico e de mercado (EPE, 2014). O esquema pode ser visto na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Níveis de potencial de uma fonte geradora de energia.



Fonte: EPE, 2014.

Uma vez analisado o potencial da fonte geradora e sua viabilidade seja aferida e confirmada, passa-se então para a fase de projetos para transformá-lo num empreendimento.

Na Tabela 2.1, é mostrada a potência instalada em operação de empreendimentos em geração FV no Brasil em diversos estados. Já na Tabela 2.2 está apresentado a potência dos empreendimentos que estão em construção no país.



Tabela 2.1 – Empreendimentos (potência instalada em operação)

Estados	Potência instalada em operação		
	Número de empreendimentos TOTAL	Potência instalada em operação (MWp)	(%)
BA	6	122,508	84,95%
PE	2	10,000	6,93%
SC	3	4,000	2,77%
MG	4	2,829	1,96%
RN	2	1,105	0,77%
SP	6	1,100	0,76%
CE	1	1,000	0,69%
MT	1	0,900	0,62%
RJ	1	0,450	0,31%
AM	14	0,176	0,12%
MA	2	0,052	0,04%
RS	3	0,049	0,03%
PR	3	0,022	0,02%
RO	1	0,020	0,01%
MS	1	0,001	0,00%
<b>BRASIL</b>	<b>50</b>	<b>144,212</b>	<b>100,00%</b>

Fonte: CERNE, 2017

Tabela 2.2 – Empreendimentos (potência em construção)

Estados	Potência em construção		
	Número de empreendimentos TOTAL	Potência em construção (MWp)	(%)
BA	11	293,40	27,59%
PI	9	270,00	25,39%
MG	8	240,00	22,57%
SP	5	150,00	14,11%
RN	4	110,00	10,34%
<b>BRASIL</b>	<b>37</b>	<b>1.063,40</b>	<b>100,00%</b>

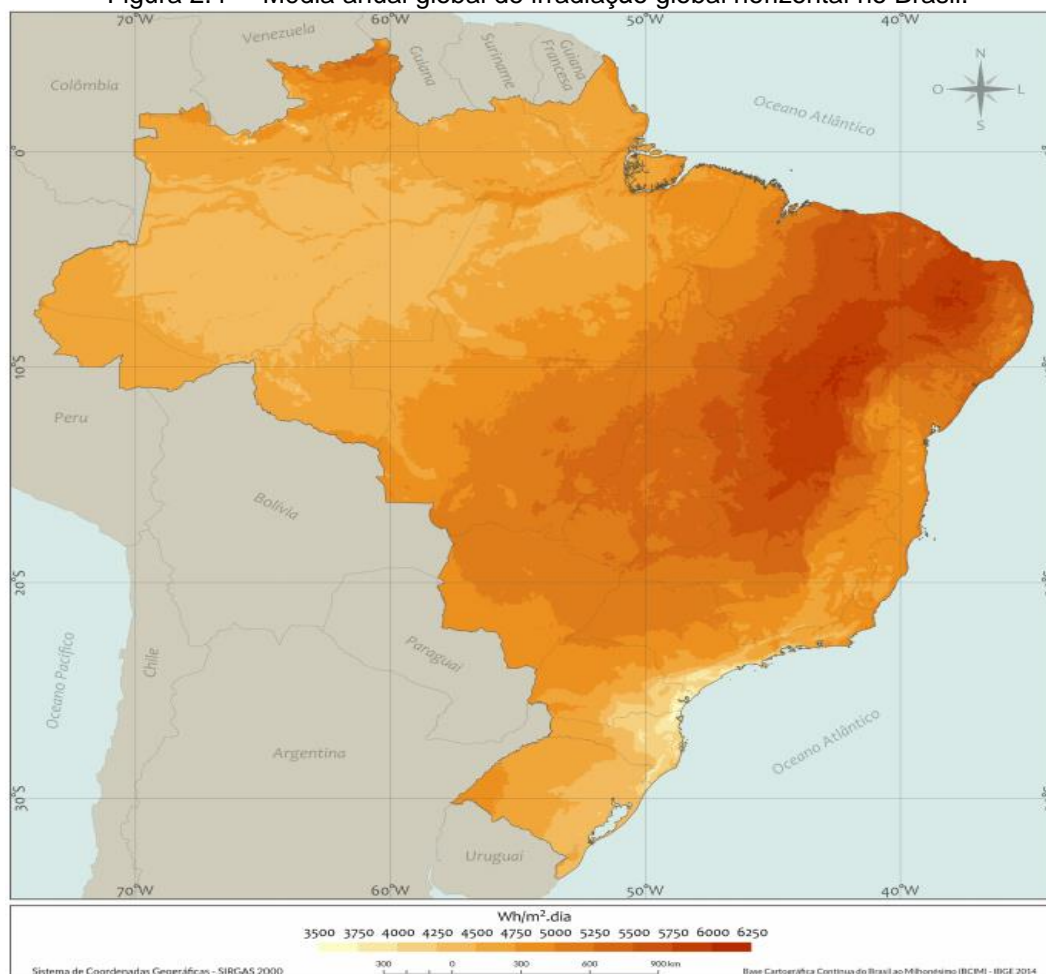
Fonte: CERNE, 2017

## 2.2 Energia solar

A energia solar vem provando ser um recurso energético adequado, a exigência de pesquisas inovadoras vem crescendo e torna-se um fator crucial para alcançar a geração de energia elétrica sustentável (RAM *et al.*, 2018).

O Brasil possui uma imensa irradiação solar anual com uma baixa variabilidade durante o ano devido sua localização em uma região próxima ao equador (DO SACRAMENTO *et al.*, 2015). Figura 2.4 apresenta a média anual global de irradiação global horizontal no Brasil. Para maximizar o uso da irradiação solar, a posição do coletor ou do módulo solar pode ser ajustada de acordo com a latitude local e a época do ano em que é necessário mais energia (FERREIRA *et al.*, 2018).

Figura 2.4 – Média anual global de irradiação global horizontal no Brasil.



Fonte: ABSOLAR, 2017.

### 2.2.1 **Sistemas FV**

A energia solar é considerada uma das alternativas energéticas mais promissoras por sua sustentabilidade. A energia solar é livre e significativamente disponível em todo o mundo. A aplicação mais comum para o uso de energia solar é através dos sistemas FV. Os módulos FV são um dos produtos mais eficazes, sustentáveis e ecológicos no campo das energias renováveis (SAHU *et al.*, 2016).

O efeito FV como é denominado o processo de geração de energia elétrica através da conversão direta da luz em eletricidade é o princípio básico desse tipo de geração, para isso são utilizados painéis onde há células FV, unidade fundamental do processo de conversão, fabricadas com material semicondutor (EPE, 2014).

Sistemas FV podem ser classificados em cinco grupos diferentes, que segundo FERREIRA *et al.* (2018), são:

1. Conectado à rede: o sistema FV conectado à rede, geralmente instalado em telhados e edifícios, consiste em um módulo FV que converte a energia do sol em eletricidade (corrente contínua) em que é necessária a presença de um inversor, que converte diretamente corrente em corrente alternada com tensão e frequência compatíveis com os padrões de rede elétrica aos quais o sistema está conectado. As principais vantagens deste tipo de sistema são a alta produtividade, a ausência de bateria e o desligamento automático em caso de falta de energia da rede, evitando o fenômeno de isolamento.
2. Isolados: sistemas FV isolados ou independentes são instalados em áreas de difícil acesso à rede elétrica, geralmente áreas rurais. Neste caso, a energia FV é a única fonte de eletricidade e é necessário algum armazenamento, como em baterias.

3. A geração híbrida - FV funciona em conjunto com outras, como turbinas eólicas ou diesel; por serem mais complexos, esses sistemas requerem um controle capaz de integrar diferentes formas de geração de energia elétrica. Estes sistemas podem ser conectados à rede, sozinhos ou com a rede de suporte.

4. Usinas de energia solar - Esses sistemas também conectados à rede, produzem muita eletricidade em um único ponto. O tamanho da planta varia de centenas de quilowatts e megawatts.

5. Aplicados em bens de consumo - as células FV também podem ser aplicadas em vários equipamentos elétricos, como relógios, calculadoras, brinquedos, carregadores de bateria ou telhados solares para carregar carros elétricos, sistemas de irrigação, sinalização em rodovias, postes ou telefones públicos, entre outros (p. 182-183).

### **2.3 Geração FV**

Capturar energia solar através de painéis FV como maneira de geração de energia elétrica é considerado um dos mercados mais promissores no setor de energias renováveis (SAMPAIO *et al.*, 2017).

A inserção de um sistema FV envolve primeiramente o dimensionamento desse sistema, que é o ajuste entre a energia radiante recebida pelos módulos e a adequação para suprir uma demanda definida de energia elétrica. O projeto de um sistema FV consiste em estudos a respeito da orientação dos módulos, disponibilidade de recurso solar e área de instalação, localização de instalação, demanda e outros fatores (CRESESB, 2014).

De acordo com CRESESB, 2014, um projeto de um SFV, sem seguimento solar ou concentração de radiação solar possui cinco ou seis etapas básicas, a depender do tipo do projeto a ser implantado, são elas:

1. Levantamento de dados para saber qual o recurso solar disponível no local;
2. Definir o local de instalação e configurações do sistema;
3. Levantamento de dados sobre demanda e consumo de energia;
4. Dimensionamento do gerador FV;
5. Dimensionamento dos equipamentos de condicionamento de potência (conversores, inversores, controladores de carga, dentre outros dispositivos) de acordo com o tipo de sistema a ser utilizado;
6. Dimensionamento do sistema de armazenamento (no caso de sistemas isolados).

## **2.4 Instalações de sistemas FV**

Segundo SAHU *et al.*, 2016, as instalações de plantas FV podem ser classificadas em cinco diferentes tipos. Plantas em superfícies convencionais (solo), instalações em telhados, sobre canais, plantas *offshore* e sobre estruturas flutuantes.

### **2.4.1 Instalações em solo**

Nesse tipo de instalação os painéis FV são fixados em estruturas estáticas e essas são fixadas em solo por meio de colunas fixas de concreto (SAHU *et al.*, 2016), como são apresentados na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Instalações em solo.



Fonte: SAHU *et al.*, 2016.

### 2.4.2 Instalações em telhados

Segundo SAHU *et al.*, 2016, nesse tipo de instalação os painéis FV são instalados sobre telhados de edifícios residenciais ou comerciais, podendo ser de modelo *on-grid* ou *off-grid* (ligado ou não à rede elétrica). Esse tipo de instalação é apresentado na Figura 2.6.

Os projetos para tal tipo de instalação deve levar em consideração o efeito de sombreamento, devido a prédios ou mesmo árvores nos arredores do telhado onde esses painéis forem instalados, pois o sombreamento pode influenciar substancialmente a geração de eletricidade da planta (KO *et al.*, 2015).

Figura 2.6 – Instalações em telhados.



Fonte: SAHU *et al.*, 2016.

### 2.4.3 Instalações sobre canais

Para evitar a aquisição de uma grande área de terra, foi concebido o novo conceito de instalação de plantas FV sobre canais (SAHU *et al.*, 2016), como é mostrado na Figura 2.7. Entretanto esse tipo de instalação envolve alguns problemas. Por exemplo, é muito importante que, em nenhuma circunstância, qualquer alteração na estrutura do canal afete o principal objetivo final da infraestrutura hidráulica. Além disso, essas instalações são estruturas fortemente lineares, então pode gerar problema para conectar a energia elétrica à rede (COLMENAR-SANTOS *et al.*, 2016).

Figura 2.7 – Instalações sobre canais.



Fonte: COLMENAR-SANTOS *et al.*, 2016.

### 2.4.4 Plantas offshore

Os oceanos correspondem por cerca de 70% da superfície terrestre, o que abre uma oportunidade de geração de energia elétrica, visto que esse recurso solar disponível poderia ser explorado utilizando a tecnologia FV. Por conta da escassez de terras *onshore* em alguns países, o ambiente *offshore* é uma opção para a construção de instalações FV (SAHU *et al.*, 2016). Esse tipo de instalação deve levar em conta a necessidade de infraestrutura específica

para distribuição da energia. Um exemplo de planta offshore é mostrado na Figura 2.8.

Esse tipo de sistema FV pode ser ou não instalado sobre estruturas flutuantes.

Figura 2.8 – Instalações offshore.



Fonte: SAHU *et al.*, 2016.

#### **2.4.5 Instalações sobre estruturas flutuantes**

Esse tipo de instalação pode, também, ser considerada *offshore* quando instalada sobre oceanos, porém é apresentada como outro modelo de instalação pelo fato de nem todo sistema FV *offshore* ser flutuante.

Instalações FV sobre estruturas flutuantes são um novo conceito, com poucas implementações comerciais sendo realizadas atualmente e alguns projetos de demonstração implantados em todo o mundo. Esses sistemas solares flutuantes são instalados em diversos tipos de corpos d'água (SAHU *et al.*, 2016). Na Figura 2.9 são apresentados alguns projetos de instalações sobre estruturas flutuantes na Itália.



A tecnologia foi criada como maneira alternativa de instalação de painéis FV em lugares onde há escassez de área seca para a instalação de usinas fotovoltaicas (UFV) (CHOI, 2014).

Se destacam em países onde o acúmulo populacional em certas áreas dificulta a implantação de grandes usinas, ocasionado assim a necessidade de instalação dessas usinas em corpos d'água (TRAPANI e SANTAFÉ, 2015). Principalmente ilhas como Japão, Singapura, Coréia, Filipinas. Já existe uma demanda por UFV flutuantes no Japão, EUA, Coréia, Austrália, Brasil, Índia e outros. Demanda que provavelmente aumentará e se espalhará por todo o mundo. Sistemas solares flutuantes podem ser instalados em corpos d'água, tais como lagos, lagos, reservatórios, represas, usinas de tratamento de águas residuais, fazendas de peixes, barragens e canais (SAHU *et al.*, 2016).

Figura 2.9 – Instalações sobre estruturas flutuantes.



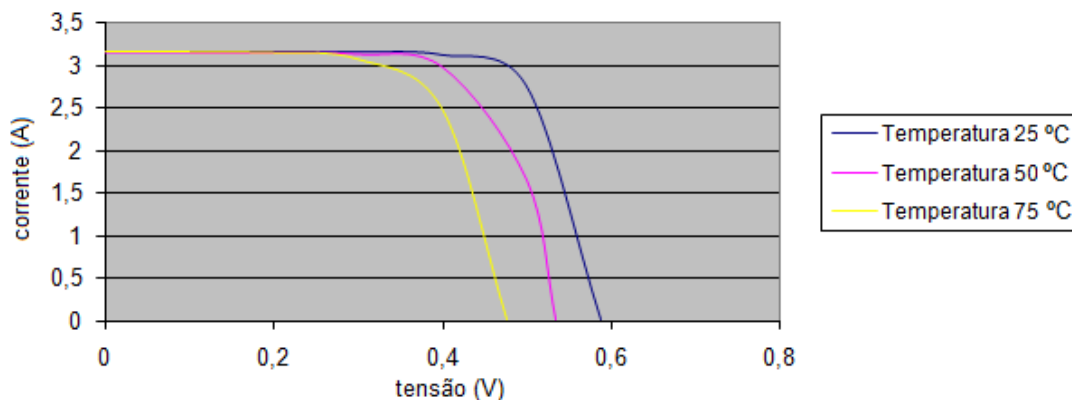
Fonte: TRAPANI e SANTAFÉ, 2015. (adaptado)

## 2.5 Comportamento térmico e eficiência dos módulos FV

A temperatura desempenha um papel central no processo de conversão FV, uma vez que afeta valores absolutos de propriedades elétricas básicas, como a tensão e a corrente do gerador FV (SKOPLAKI e PALYVOS, 2009). Esse fato pode ser visto na Figura 2.10, que representa um gráfico elaborado por Do Sacramento, 2015, apresentando influência da temperatura nas curvas de corrente-tensão (I-V).

Semelhante a outros dispositivos semicondutores, as células solares também são sensíveis às gradientes de temperatura. Aumentos na temperatura do material afetam os parâmetros do material. À medida que a temperatura do módulo solar aumenta, sua corrente de saída aumenta discretamente, enquanto a saída de tensão é reduzida linearmente. Como resultado, o calor pode reduzir severamente a geração do módulo solar (MUSCAT, 2014; SKOPLAKI e PALYVOS, 2009).

Figura 2.10 – Curvas I-V de módulo FV em função de sua temperatura.



Fonte: DO SACRAMENTO, 2015.

A eficiência elétrica é influenciada principalmente pelo tipo de módulo FV usado. Um módulo FV típico converte 6-20% da radiação solar incidente em eletricidade, dependendo do tipo de células solares e condições climáticas. O resto da radiação solar incidente é convertida em calor, o que aumenta

significativamente a temperatura do módulo fotovoltaico e reduz a eficiência FV do módulo (DUBEY *et al.*, 2013).

Existem diversas correlações entre a temperatura da célula fotovoltaica,  $T_c$ , como uma função de variáveis meteorológicas, como a temperatura ambiente,  $T_a$ , a velocidade do vento,  $V_w$ , bem como a irradiação solar,  $G_T$ . Algumas correlações levam em consideração as propriedades do material do módulo como por exemplo, transmitância do vidro, absorvância da placa, entre outros (SKOPLAKI e PALYVOS, 2009).

Dubey *et al.* (2013) fizeram um levantamento de modelos matemáticos encontrados na literatura para descrever o comportamento numérico da eficiência de painéis FV em função da temperatura.

A Tabela 2.1. apresenta algumas das correlações utilizadas para calcular a eficiência de painéis FV que possuem células FV policristalinas extraídas da literatura apresentadas por Dubey *et al.* (2013)

Tabela 2.1 – Correlações da eficiência de painéis FV em função da temperatura.

Correlações	Equação
$\eta(I(t), T_c) = \eta(I(t), 25^\circ C) \cdot [1 + c(T_c - 25)]$	(2.1)
$\eta_T = \eta_0 - K(T^{1/4} - T_0^{1/4})$	(2.2)
$\eta = -0,053T_{back} + 12,62$	(2.3)

Fonte: Dubey *et al.* (2013) (adaptado)

Na Equação (2.1), “c” representa a redução de eficiência,  $c = - 0,5 \text{ \%}/^\circ\text{C}$  para módulos de silício policristalino,  $c = - 0,02 \text{ \%}/^\circ\text{C}$  para módulos de silício monocristalino e  $c = - 0,41 \text{ \%}/^\circ\text{C}$  para módulos de célula de filme fino,  $\eta(I(t), 25^\circ\text{C})$  representa a eficiência do módulo à uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , esse valor é fornecido pelo fabricante nas especificações do módulo FV.

Na Equação (2.2), K representa uma constante ( $K = 22,4$ ), T representa a temperatura real do módulo medida e  $T_0 = 273 \text{ K}$ . Na Equação (2.3),  $T_{back}$ , representa a temperatura real medida da parte traseira do módulo FV.

### 3. EXPERIÊNCIAS DE PLANTAS FV FLUTUANTES

O uso de tecnologia de estruturas flutuantes é um novo modelo para instalação de plantas FV sobre os corpos d'água. A geração de energia elétrica resulta da combinação de tecnologia de módulos FV e tecnologia flutuante (SAHU *et al.*, 2016).

Os projetos de sistemas FV flutuantes existentes incluem módulos FV convencionais, bem como módulos FV concentradores. Esses projetos se beneficiam do corpo de água circundante para evitar o superaquecimento das células solares (TRAPANI e SANTAFÉ, 2015).

#### 3.1 Projetos no mundo

Os primeiros sistemas FV flutuantes foram instalados em Aichi, Japão em 2007 (um sistema) e dois na Califórnia, Estados Unidos, em 2008, como apresentado na Figura 1.1. No entanto, a maioria das plantas do mundo foram instaladas comercialmente após 2014, e até então os projetos eram voltados a pesquisa e desenvolvimento (MITTAL *et al.*, 2017; TRAPANI e SANTAFÉ, 2015).

No mundo, considerando dados até 2017, a capacidade instalada de plantas FV flutuantes já supera 200 MW, dos quais a maior parte está instalada no Japão. A maioria dos sistemas FV flutuantes foi instalada em corpos d'água artificiais, como reservatórios, lagoas de armazenamento, irrigação ou retenção e lagos (MITTAL *et al.*, 2017).

A empresa fabricante de flutuadores para painéis FV que se destaca no mercado é a Ciel & Terre, com 64 plantas instaladas ao redor do mundo, localizadas no Japão, Europa, Sul da Ásia, Estados Unidos, Panamá e Brasil. Na Figura 3.1, são apresentadas algumas plantas instaladas no mundo pela empresa (CIEL & TERRE, 2018).

Como é apresentado nas Tabelas 3.1 e 3.2, dentre as plantas flutuantes instaladas pela Ciel & Terre, 45 estão entre as 70 que mais produzem energia elétrica no mundo, um total de 96.751 kWp de potência instalados, o que representa 48,82% da potência instalada dessas 70 plantas.

Tabela 3.1 – Setenta maiores plantas FV flutuantes do mundo em potência instalada por país e fabricante.

Países Fabricantes de flutuadores	Número de sistemas	Potência Instalada (kWp)
<b>Japão</b>		
Ciel & Terre	38	66.346
Reservoir Solar Company	5	7.100
Sumitomo Mitsui Construction	3	5.920
Independentes	2	2.166
Takiron Engineering	2	3.009
Towa Arcs & Otos	1	1.200
West Energy Solutions & Kyoraku	1	2.300
Ibiden Engineering	1	2.000
West Group & Kyoraku	1	1.330
<b>China</b>		
Independentes	2	60.000
Ciel & Terre	3	17.758
<b>Coréia do Sul</b>		
LG CNS	3	9.000
Independentes	2	4.700
K-water	1	2.000
Techwin	1	706
<b>Reino Unido</b>		
Ciel & Terre	2	9.329
<b>Taiwan</b>		
Ciel & Terre	1	2.320
<b>Bélgica</b>		
Ciel & Terre	1	998
<b>Total</b>	<b>70</b>	<b>198.182</b>

Fonte: SOLAR ASSET MANAGEMENT ASIA, 2018. (adaptado)

Figura 3.1 – Plantas instaladas pela Ciel &amp; Terre no mundo.



Fonte: CIEL & TERRE, 2018. (adaptado)

Tabela 3.2 – Potência instalada das 70 maiores plantas FV flutuantes do mundo por fabricante.

Fabricantes	Potência Instalada (kWp)
Ciel & Terre	96.751
Independentes	66.866
LG CNS	9.000
Reservoir Solar Company	7.100
Sumitomo Mitsui Construction	5.920
Takiron Engineering	3.009
West Energy Solutions & Kyoraku	2.300
Ibiden Engineering	2.000
K-water	2.000
West Group & Kyoraku	1.330
Towa Arcs & Otos	1.200
Techwin	706
<b>Total</b>	<b>198182</b>

Fonte: SOLAR ASSET MANAGEMENT ASIA, 2018. (adaptado)

As plantas com maior geração de energia elétrica encontram-se no Japão e China. Pode-se destacar as instalações na China, onde há duas plantas com um total de 60.000 kWp de potência instalada. Ambas as plantas foram instaladas em um lago localizadas em área de subsidência de mineração de carvão no distrito de Panji, uma de 40.000 kWp com mais de 120 mil painéis FV e outra de 20.000 kWp (SOLAR ASSET MANAGEMENT ASIA, 2018).

### **3.2 Projetos no Brasil**

Em 2016 entrou em funcionamento o primeiro projeto com financiamento exclusivo para a plantas FV flutuantes no Brasil na Usina Hidrelétrica de Balbina, no Amazonas. Esse projeto foi o primeiro no mundo com a finalidade de explorar energia solar em lagos de usinas hidrelétricas com uso de flutuadores (QSI – Engenharia Elétrica, 2016).

O protótipo da usina solar flutuante tem 60 m<sup>2</sup> de área coberta por módulos FV em funcionamento. Em sua primeira fase a capacidade instalada foi de 1 MWp, e previsão para ampliação de sua capacidade instalada na segunda fase de mais 4 MWp, totalizando uma planta de 5 MWp de potência instalada no final de 2017. Esse foi o pontapé inicial para o lançamento de um protótipo similar na Usina Hidrelétrica de Sobradinho, na Bahia (QSI – Engenharia Elétrica, 2016).

Em 2016, na Usina Hidrelétrica de Sobradinho, foi também instalado um protótipo semelhante ao de Balbina, sua capacidade inicial instalada foi de 1 MWp na primeira fase e com incremento de 4 MWp em uma segunda fase prevista para o final de 2017 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016). Essa planta é apresentada na Figura 3.2.

A escolha do local de instalação das duas usinas teve como fatores facilitadores, a possibilidade do aproveitamento das subestações e as linhas de transmissão das hidrelétricas e a grande disponibilidade de área sobre a lâmina d'água dos reservatórios, evitando desapropriação de terras (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

Ambos projetos foram idealizados pelos setores de pesquisa e desenvolvimento a partir da parceria entre as entidades que participaram do projeto, dentre elas a Sunlution (empresa que fornece flutuadores), WEG, Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da UFPE (FADE), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Fundação de Apoio Rio Solimões (UNISOL) e Universidade Federal do Amazonas (UFAM) (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

Figura 3.2 – Plantas FV instaladas em fazenda (Goiás/Brasil).



Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016.

Outro projeto no Brasil, iniciado em maio de 2014, recebeu investimento de R\$ 23 milhões da CESP – Companhia Energética de São Paulo e consiste na instalação de duas plantas com módulos FV rígidos de 250kWp em terra e 25kWp em sistema flutuante, e outras duas plantas com painéis solares flexíveis com 250 kWp em terra e 25 kWp em sistemas flutuantes (SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO – SÃO PAULO, 2016).

Foram instalados 180 flexíveis flutuantes de 144 Wp cada. A área ocupada pelas placas flutuantes é de aproximadamente 500 m<sup>2</sup>, e o reservatório possui 2.250 km<sup>2</sup>. Os flutuadores instalados no reservatório da usina de Porto Primavera foram desenvolvidos especificamente para esse projeto por uma empresa paulista e entrou em funcionamento no final de 2016 (SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO – SÃO PAULO, 2016).



Há ainda um outro projeto no Brasil, feito pela Ciel & Terre e, diferentemente dos outros, esse foi um projeto privado em uma propriedade rural em Goiás. A planta consiste em um sistema instalado sobre um lago de irrigação, onde 46% de sua área foi coberta pelos flutuadores. Possui 1150 módulos de 265 Wp e com potência total instalada de 305 kWp (CIEL & TERRE, 2018), essa planta é apresentada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Plantas FV instaladas em fazenda (Goiás/Brasil).



Fonte: CIEL & TERRE, 2018.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Módulo FV utilizado

Para o presente estudo foram utilizados dois módulos FV iguais de 20Wp da Kyocera Solar, produzidos pela Kyocera, modelo KS20T, cujas especificações são apresentadas na Tabela 4.1. Ambos painéis foram utilizados sem a moldura externa de alumínio, reduzindo sua massa total em 31,18%.

Tabela 4.1 – Especificações do módulo FV modelo Kyocera KS20T.

Característica	Valor
Potência Nominal ( $P_{nom}$ )	20 Wp
Corrente de Curto-Circuito ( $I_{oc}$ )	1,24 A
Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )	21,70 V
Corrente de Máxima Potência ( $I_{max}$ )	1,16 A
Tensão de Máxima Potência ( $V_{max}$ )	15,0 V
Temperatura de referência ( $T_0$ )	25 °C
Irradiância de referência ( $G_0$ )	1.000 W/m <sup>2</sup>
Massa do módulo com moldura	2.550 g
Massa do módulo sem moldura	1.755 g
Largura do módulo sem moldura	34,4 cm
Comprimento do módulo sem moldura	51,2 cm

Fonte: KYOCERA SOLAR (2017). (adaptado)

#### 4.1.1 Primeira etapa

A primeira etapa da pesquisa consistiu na exposição de um dos módulos FV utilizados a um ambiente convencional, instalado sobre o solo, conforme apresentado na Figura 4.1. Esse módulo FV foi posicionado sobre folhas de isopor para não haver contato direto com o solo e, portanto, alteração nos valores de temperatura aferidos através dos sensores posicionados sobre sua parte traseira.

Figura 4.1 – Módulo FV instalado sobre o solo.



O segundo módulo FV foi instalado em uma estrutura flutuante de isopor sobre o espelho d'água de um tanque de 12.000 L com 1,20m de altura e 3,80 de diâmetro localizado no LEA, conforme Figura 4.2.

A distância entre módulo FV e espelho d'água foi ajustada a cada três dias, retirando-se uma camada de isopor de 1,5 cm de altura de cada vez. As distâncias entre o espelho d'água e o módulo FV para o experimento variaram de 7,5 cm, 6,0 cm, 4,5 cm e 3,0 cm.

A área do lado traseiro do módulo exposta, sem isopor, ao ambiente foi de 1.142,08 cm<sup>2</sup> o que equivale a 64,85% da área total do módulo.

Figura 4.2 – Módulo FV instalado sobre água.



### 4.1.2 Segunda etapa

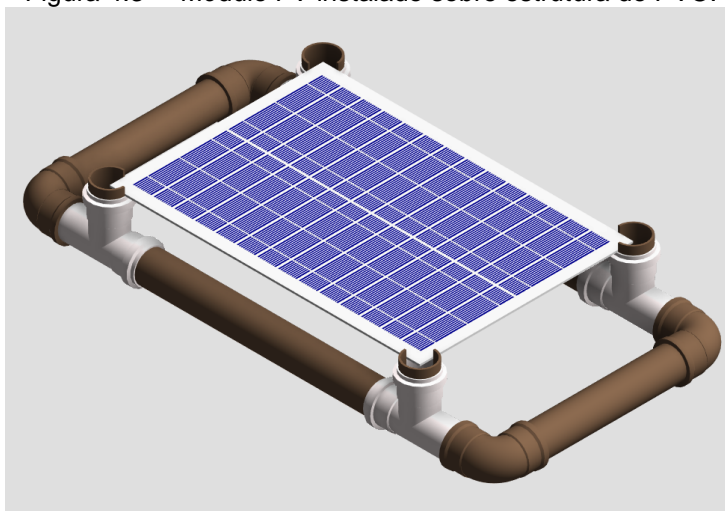
Na segunda etapa da pesquisa, foi produzida uma estrutura flutuante utilizando tubos de PVC sobre a qual o módulo FV foi instalado. Esta estrutura, diferentemente da estrutura utilizada na primeira etapa da pesquisa, permite maior fluxo de ar sob o módulo e exibe menor isolamento do fluxo de calor por convecção entre água e módulo.

O projeto idealizado é apresentado na Figura 4.3 e a versão real utilizada no presente trabalho é apresentada na Figura 4.4. O custo total do flutuador e sua composição são descritos na Tabela 4.3

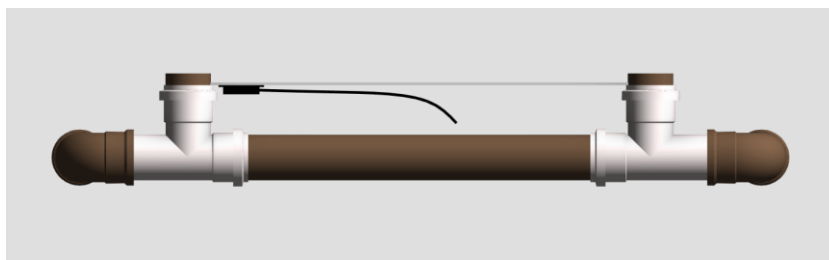
Tabela 4.3 – Custo total dos componentes do flutuador.

Item	Preço
Tubo PVC 50 mm (2m)	R\$ 7,76
Tê esgoto 50 mm (4 unidades)	R\$ 18,48
Joelho 90° PVC (4 unidades)	R\$ 19,96
Cola para PVC (75g)	R\$ 2,27
<b>Custo Total</b>	<b>R\$ 48,47</b>

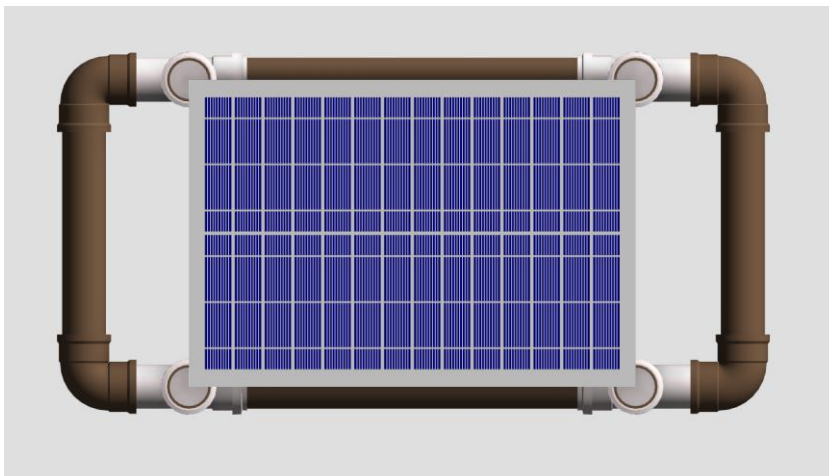
Figura 4.3 – Módulo FV instalado sobre estrutura de PVC.



(a) Vista isométrica

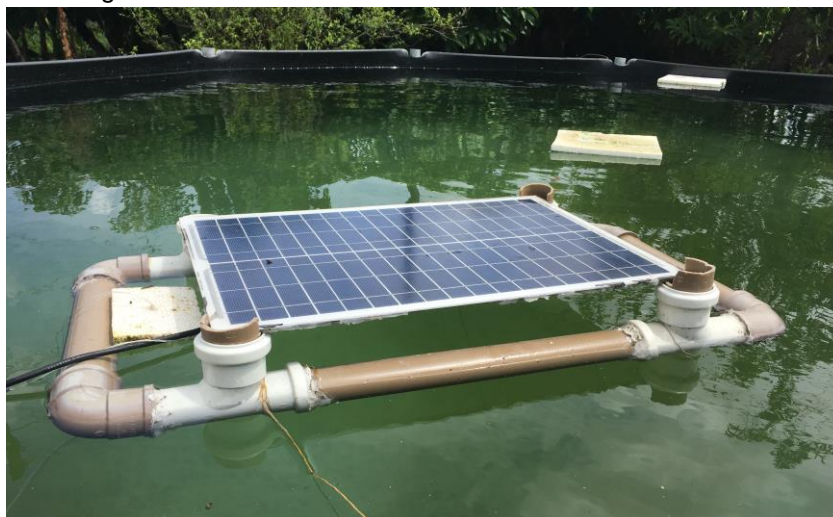


(b) Vista lateral



(c) Vista superior

Figura 4.4 – Módulo FV instalado sobre estrutura de PVC.



## 4.2 Sensores

### 4.2.1 Sensores de temperatura

Os sensores utilizados para o presente estudo foram modelos PT-100 à prova d'água, conforme apresentado na Figura 4.5. O sensor PT-100 é um tipo particular de Detector de Temperatura por Resistência (RTD – *Resistance Temperature Detectors*) que mede a temperatura pela correlação da sua resistência elétrica com a temperatura ( $100 \Omega$  a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (OMEGA ENGINEERING BRASIL, 2017).

Figura 4.5 – Sensores PT-100.



Para a pesquisa foram utilizados três (03) sensores de mesmo modelo, com modo de conexão de 3 fios. Um dos sensores foi posicionado na parte traseira do módulo FV instalado sobre o solo, com objetivo de aferir a temperatura da superfície traseira do módulo. O segundo foi posicionado na parte traseira do módulo FV instalado sobre a estrutura flutuante, e o terceiro foi

posicionado dentro do tanque pra medir a temperatura da água do tanque onde o módulo FV flutuante foi instalado.

A escolha do PT-100 como sensor para o presente estudo deu-se devido a várias vantagens: Ampla faixa de temperatura, boa precisão e boa permutabilidade (melhor que termopares) e estabilidade em longo prazo. Além dessas vantagens descritas, os sensores PT-100 apresentam aplicabilidade para medição de temperatura de líquidos e superfícies (OMEGA ENGINEERING BRASIL, 2017), fator que corroborou para sua escolha, uma vez que um dos sensores foi exposto em contato direto com a água.

Com finalidade de evitar infiltrações, foi adicionada uma proteção extra de silicone aos terminais de ligação dos sensores que foram posicionados em ambiente com água.

#### *4.2.1.1 Calibração dos sensores de temperatura*

Com finalidade de manter os dados coletados dentro das incertezas de medição, foi utilizado um a termômetro infravermelho visual Fluke VT02, conforme apresentado na Figura 4.6, para avaliar os dados coletados em tempo real. Esse procedimento foi executado antes do início da aquisição de dados e repetido durante dias posteriores visando avaliar a qualidade das medições feitas.

O procedimento realizado foi o de ajuste manual dos transmissores de temperatura através da comparação dos dados verificados a partir da câmera térmica e dados apresentados na tela do sistema de monitoramento. O ajuste foi executado de acordo com a necessidade de cada sensor de ser ou não recalibrado para o início da coleta dos dados, com finalidade de obter relatórios de dados coerentes. As especificações da câmera térmica são apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Especificações da Câmera Térmica VT02.

Característica	Valor
Amplitude de medição de temperatura	-10 a 250 °C
Precisão de medida	± 2 °C
Frequência de captura de imagem	8 Hz
Sensibilidade térmica	≤ 250 mK
Banda espectral infravermelha	6,5 a 14 µm
Câmera visual	11025 pixels
Compensação de temperatura	Sim
Correção de emissividade	Sim
Correção de erro de paralaxe	Sim

Fonte: FLUKE, 2012. (adaptado)

Figura 4.6 – Termômetro infravermelho visual Fluke VT02.





### 4.2.2 Piranômetro

Os dados de irradiância solar global incidente no plano horizontal foram medidos através de um piranômetro de segunda classe de modelo LP02 do fabricante Hukseflux. Modelo que está em conformidade com o manual da *World Meteorological Organization* (WMO) e a ISO 9060 (HUKSEFLUX, 2016).

Na Figura 4.7 é apresentado o piranômetro instalado no LEA-UFC, alinhado com o plano horizontal. São apresentadas na Tabela 4.5 especificações do modelo utilizado.

Tabela 4.5 – Especificações do piranômetro LP02.

Característica	Valor
Tempo de resposta (95%)	18 s
Sensibilidade (nominal)	$15 \times 10^{-6} \text{ V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
Saída esperada sob irradiação solar natural	-0,1 a $50 \times 10^{-3} \text{ V}$
Faixa espectral	0,285 a $3 \times 10^{-6} \text{ m}$
Faixa de medição	0 a $2000 \text{ W}/\text{m}^2$
Faixa de resistência do sensor	40 a $60 \Omega$
Temperatura de operação	-40 a $80 \text{ }^\circ\text{C}$
Classe de proteção IP	IP 67

Fonte: HUKSEFLUX (2016). (adaptado)

Figura 4.7 – Piranômetro Hukseflux LP02.



### 4.3 Sistema de monitoramento e aquisição de dados

Os sensores de temperatura utilizados na presente pesquisa foram conectados a transmissores de temperatura da marca NOVUS, modelo TxRail, equipamentos disponíveis no LEA-UFC e utilizados para adquirir dados da mesma natureza desse trabalho, mostrados na Figura 4.8. Os transmissores aceitam sensores de temperatura PT-100 a uma faixa de temperatura de -200 a 650 °C (Novus, 2016).

Figura 4.8 – Transmissores de temperatura NOVUS.



Os sensores de corrente e tensão foram conectados a um módulo de Entrada/Saída (sinal analógico e digital) remoto Atos BRiO que se comunica com o sistema supervisor. Os sensores e o módulo são apresentados na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Sensores de tensão e corrente e módulo de comunicação Atos BRiO.



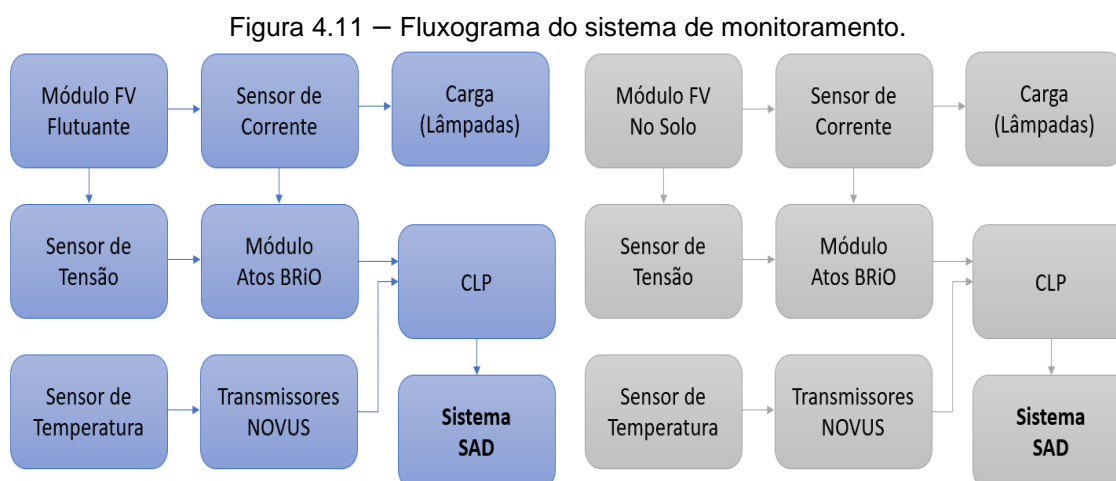
A carga utilizada foram duas lâmpadas fluorescentes de 12W para sistemas de corrente contínua. Os sensores e o módulo são apresentados na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Carga utilizada (lâmpadas).



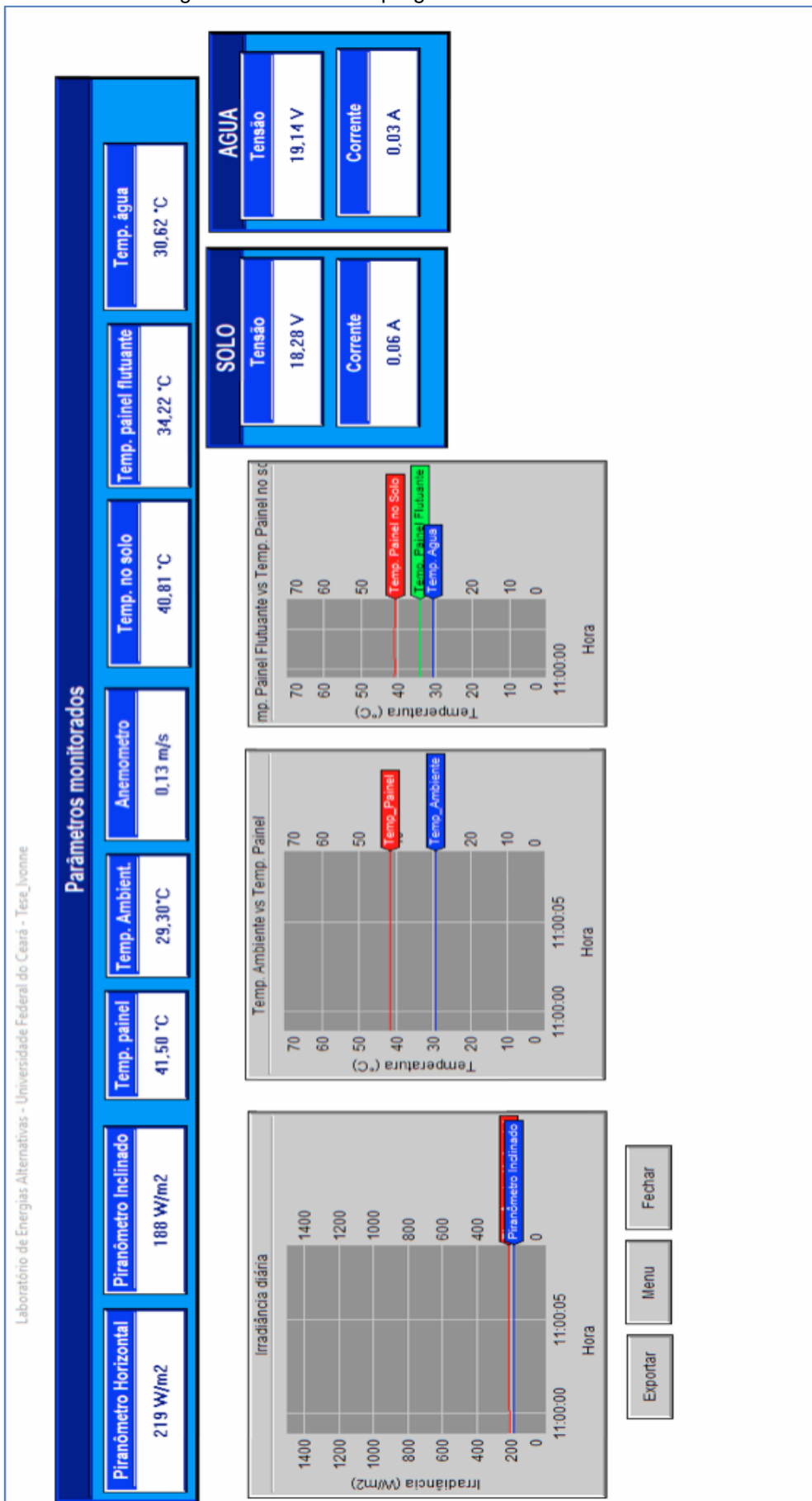
Ambos módulos FV (sobre o solo e flutuante), foram conectados diretamente aos sensores de tensão e corrente, e esses ao módulo de comunicação Atos BriO. Para aquisição de dados de corrente, o sensor de corrente foi conectado a uma carga (lâmpadas). Os sensores de temperatura PT-100 foram conectados aos transmissores de temperatura da NOVUS. O fluxograma do sistema de monitoramento de dados utilizado na pesquisa é apresentado na Figura 4.11.

Por fim, o módulo Atos BRiO e os transmissores NOVUS foram conectados ao CLP, e este se comunicava com o sistema SAD (sistema de aquisição de dados) instalado no computador do LEA-UFC.



Todas as medições efetuadas pelos sensores descritos foram coletadas por um sistema supervisório composto por controladores lógicos programáveis (CLP). O sistema de supervisão e aquisição de dados comercial utilizado é composto por um *software* de monitoramento, e o CLP como protocolo de comunicação para supervisionar e armazenar as variáveis e os dispositivos de sistemas de controle conectados através de *drivers* específicos (Dupont, 2016). Esse sistema já foi utilizado em pesquisas anteriores do LEA-UFC. Os dados monitorados foram apresentados em uma tela que fornece os dados em tempo real, como é representado na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Tela do programa de monitoramento.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir da primeira etapa da pesquisa através dos experimentos realizados no LEA-UFC são apresentados em forma de gráficos. Na Figura 5.1 são apresentados o comportamento da temperatura dos módulos FV sobre o solo e flutuante a uma distância de 7,5 cm em relação ao espelho d'água, já na Figura 5.2 são apresentados os dados de irradiância e velocidade do vento para o mesmo dia. Na Figura 5.3 a distância é de 6 cm, na Figura 5.5 a distância é 4,5 cm e na Figura 5.7 é apresentado o módulo FV com distância de 3 cm em relação à água, já nas Figura 5.4, Figura 5.6 e Figura 5.8 são respectivamente apresentados os dados de irradiância e velocidade do vento dos dias apresentados nas Figura 5.3, Figura 5.5 e Figura 5.7. Todos os gráficos representam dados de temperaturas coletados durante 13 horas (das 5:00 às 18:00 h) dos dias 11 de novembro de 2017 a 22 de novembro de 2017, sendo possível observar que há uma similaridade entre as curvas de temperatura dos dois painéis durante todo o dia.

Conforme dados da Figura 5.1, as médias das temperaturas dos módulos FV monitorados foram  $43,40^{\circ}\text{C}$  para o módulo instalado sobre estrutura flutuante a 7,5 cm de altura em relação à água e  $43,47^{\circ}\text{C}$  para o módulo instalado sobre o solo. Isto representa uma redução média absoluta de  $0,07^{\circ}\text{C}$ , o que reflete em um aumento médio diário de apenas 0,04% da eficiência segundo o modelo matemático da Equação (2.1),  $\Delta\eta_1$ . Utilizando o modelo matemático da Equação (2.2), foi encontrado um aumento médio diário na eficiência do módulo flutuante  $\Delta\eta_2 = 0,07\%$ . Utilizando o modelo matemático da Equação (2.3), foi encontrado um aumento médio diário na eficiência do módulo flutuante  $\Delta\eta_4 = 0,04\%$ .

Os dados coletados mostram valores de velocidade de vento em todos os dias abaixo de 0,30 m/s onde os módulos foram instalados, o que mostra que onde a pesquisa foi desenvolvida havia uma baixa circulação de ar.

Figura 5.1 – Temperatura dos módulos FV (flutuante: 7,5 cm).

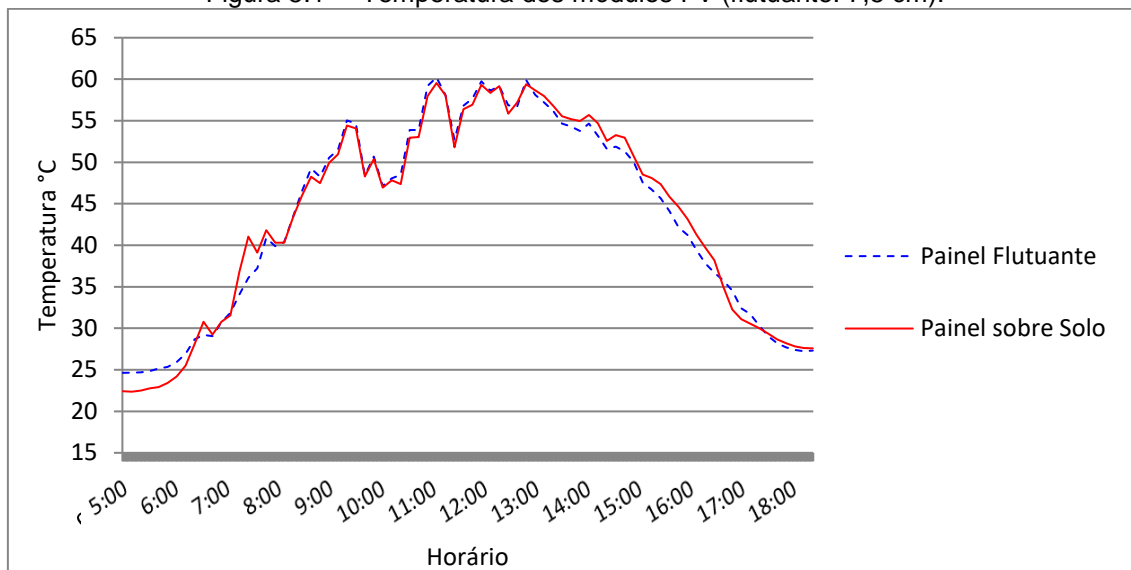
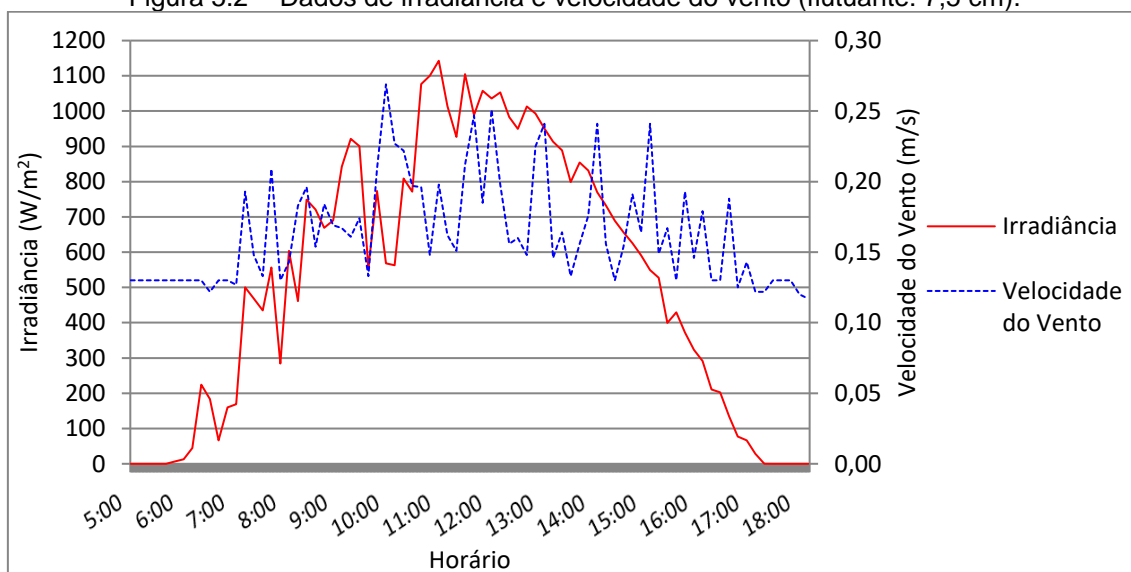


Figura 5.2 – Dados de irradiância e velocidade do vento (flutuante: 7,5 cm).



Conforme dados da Figura 5.3, as médias das temperaturas dos módulos FV monitorados foram 40,24° C para o módulo instalado sobre estrutura flutuante a 6,0 cm de altura em relação à água e 41,07° C para o módulo sobre o solo. Isto representa uma redução média absoluta de 0,83°C, o que reflete em um aumento médio diário de apenas 0,45% da eficiência segundo o modelo matemático da Equação (2.1),  $\Delta\eta_1$ . Utilizando o modelo matemático da Equação (2.2), foi encontrado um aumento médio diário na eficiência do módulo flutuante

$\Delta\eta_2 = 0,75\%$ . Utilizando o modelo matemático da Equação (2.3), foi encontrado um aumento médio diário na eficiência do módulo flutuante  $\Delta\eta_3 = 0,42\%$ .

Figura 5.3 – Temperatura dos módulos FV (flutuante: 6,0 cm).

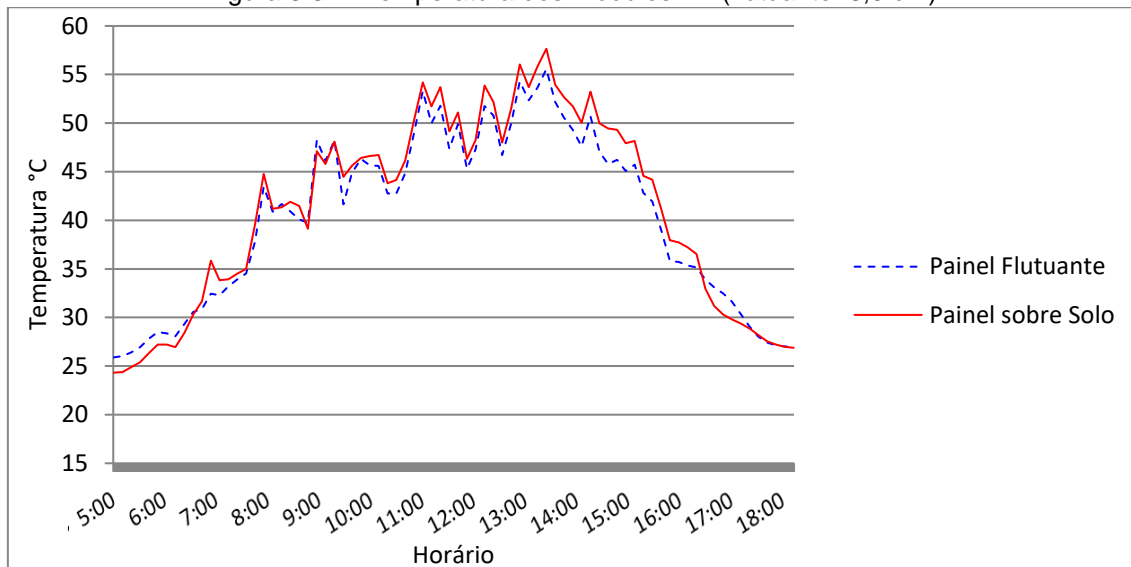
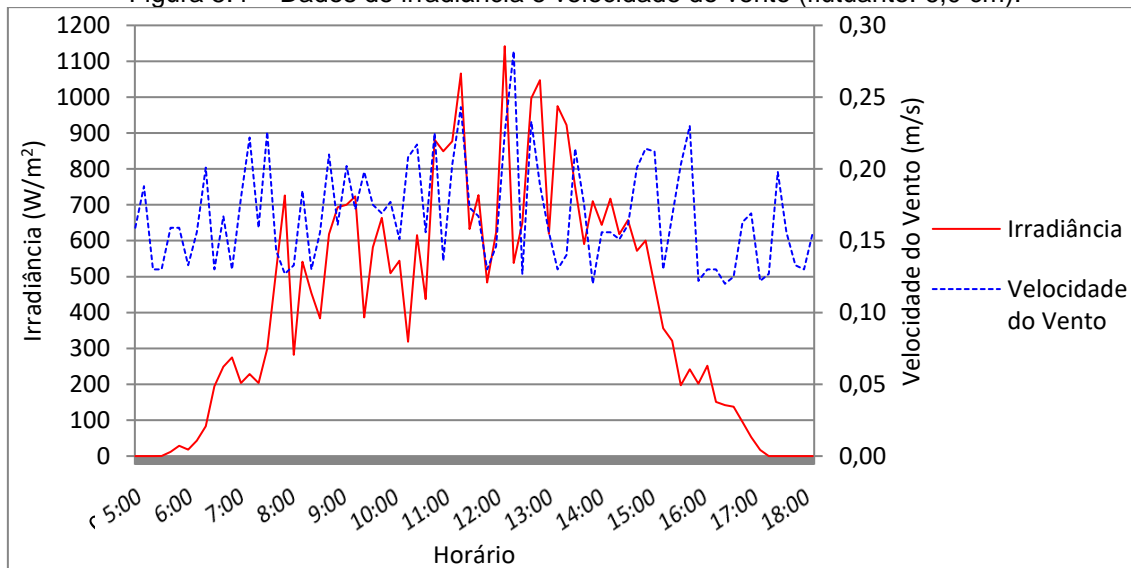


Figura 5.4 – Dados de irradiância e velocidade do vento (flutuante: 6,0 cm).



Conforme dados da Figura 5.5, as médias das temperaturas dos módulos FV monitorados foram  $39,17^\circ\text{C}$  para o módulo sobre estrutura flutuante a 4,5 cm de altura em relação à água e  $39,19^\circ\text{C}$  para o módulo sobre o solo. Isto representa uma redução média absoluta de  $0,02^\circ\text{C}$ , o que reflete em um



aumento médio diário de apenas 0,01% da eficiência segundo o modelo matemático da Equação (2.1),  $\Delta\eta_1$ . Utilizando o modelo matemático da Equação (2.2), foi encontrado um aumento médio diário na eficiência do módulo flutuante  $\Delta\eta_2 = 0,02\%$ . Utilizando o modelo matemático da Equação (2.3), foi encontrado um aumento médio diário na eficiência do módulo flutuante  $\Delta\eta_3 = 0,01\%$ .

Figura 5.5 – Temperatura dos módulos FV (flutuante: 4,5 cm).

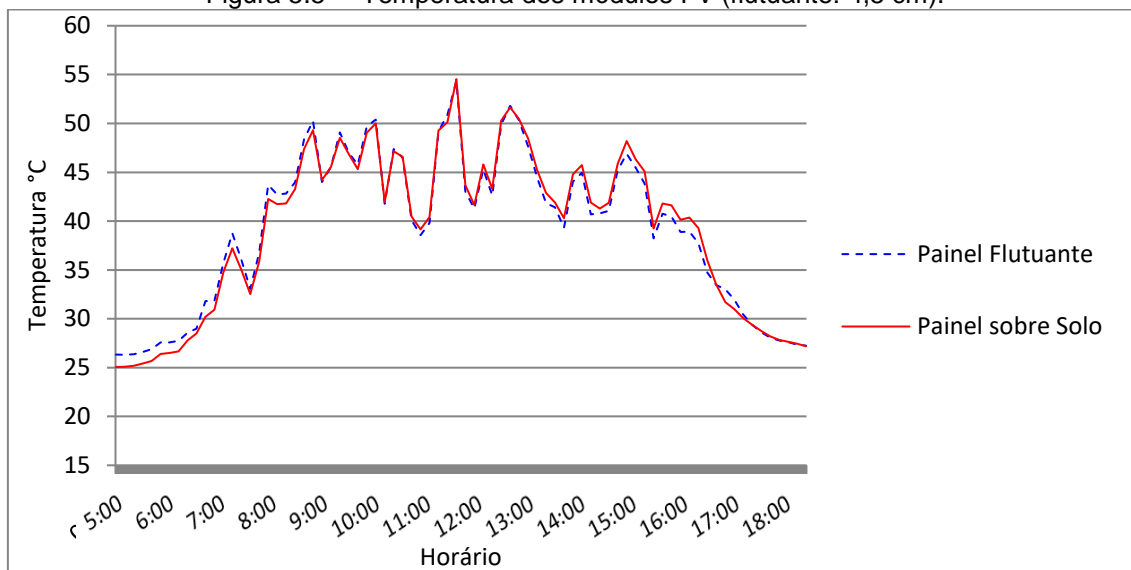
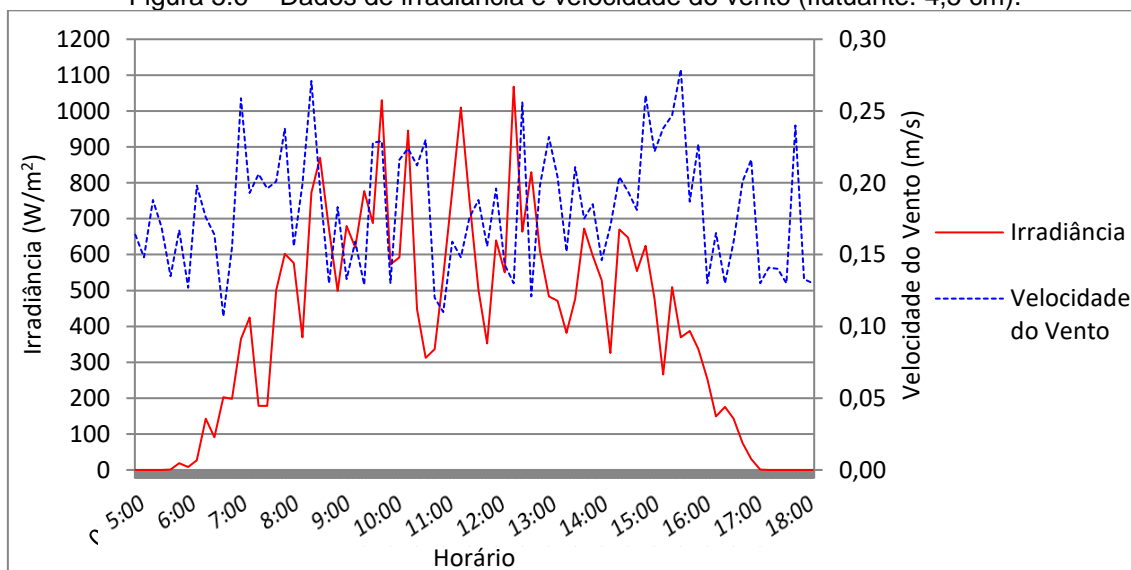


Figura 5.6 – Dados de irradiância e velocidade do vento (flutuante: 4,5 cm).



Conforme dados da Figura 5.7, as médias das temperaturas dos módulos FV monitorados foram  $41,64^{\circ}\text{C}$  para o módulo sobre estrutura flutuante a 3,0 cm de altura em relação à água e  $41,68^{\circ}\text{C}$  para o módulo instalado sobre o solo. Isto representa um aumento médio absoluto de  $0,04^{\circ}\text{C}$ , o que reflete em um decréscimo médio diário de 0,02% da eficiência segundo o modelo matemático da Equação (2.1),  $\Delta\eta_1$ . Utilizando o modelo matemático da Equação (2.2), foi encontrado um decréscimo médio diário na eficiência do módulo flutuante  $\Delta\eta_2 = 0,04\%$ . Utilizando o modelo matemático da Equação (2.3), foi encontrado um decréscimo médio diário na eficiência do módulo flutuante,  $\Delta\eta_3 = 0,02\%$ .

Figura 5.7 – Temperatura dos módulos FV (flutuante: 3,0 cm).

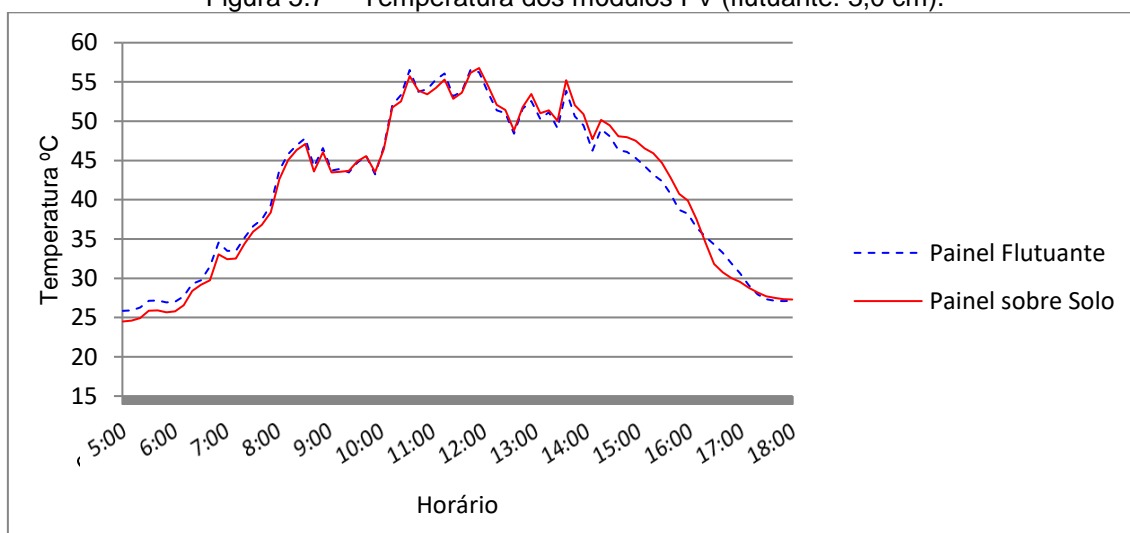
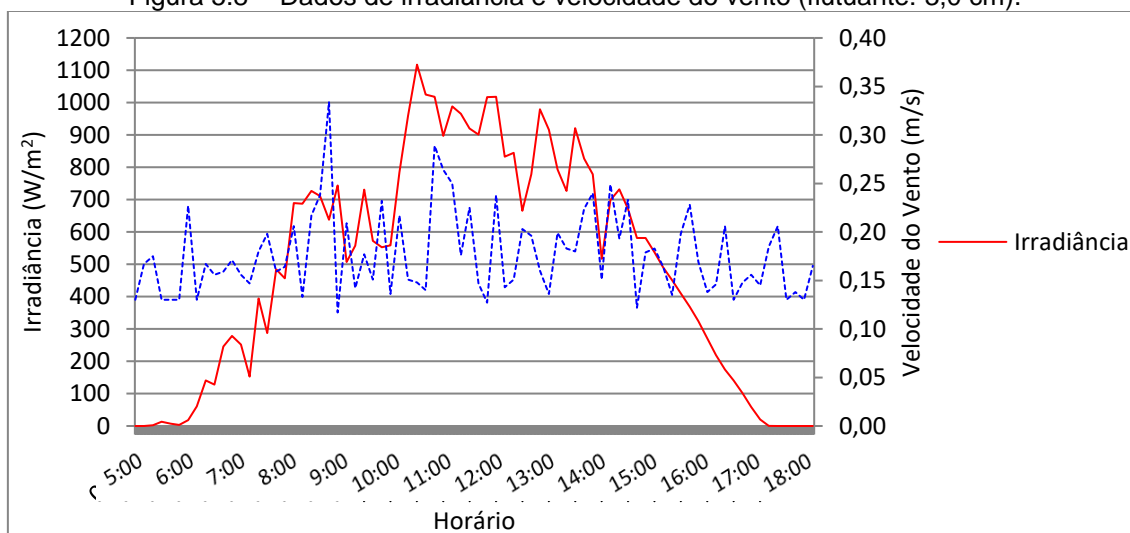


Figura 5.8 – Dados de irradiância e velocidade do vento (flutuante: 3,0 cm).



A partir do modelo matemático utilizado foi possível elaborar uma tabela com os resultados obtidos, conforme a Tabela 5.1, onde foi possível verificar que a temperatura onde o módulo FV foi exposto (sobre o solo ou sobre estrutura flutuante) não apresentou influência apreciável sobre a sua temperatura, e logo, não apresentou influência sobre a eficiência. Os valores apresentados estão dentro dos parâmetros de incerteza dos próprios sensores utilizados na pesquisa.

Tabela 5.1 – Resultados primeira etapa.

$T_{\text{Média}}$ Módulo FV sobre solo	$T_{\text{Média}}$ Módulo FV flutuante (distância)	$\Delta T_{\text{Médio}}$ absoluto	$\Delta \eta_1^*$	$\Delta \eta_2^{**}$	$\Delta \eta_3^{***}$
43,47 °C	43,40 °C (7,5 cm)	0,07 °C	0,04 %	0,07 %	0,04 %
41,07 °C	40,24 °C (6,0 cm)	0,83 °C	0,45 %	0,75 %	0,42 %
39,19 °C	39,17 °C (4,5 cm)	0,02 °C	0,01 %	0,02 %	0,01 %
41,64 °C	41,68 °C (3,0 cm)	- 0,04 °C	- 0,02 %	- 0,04 %	- 0,02 %

\*Valores calculados a partir da Eq. (2.1)

\*\*Valores calculados a partir da Eq. (2.2)

\*\*\*Valores calculados a partir da Eq. (2.3)

Os resultados obtidos a partir da segunda etapa da pesquisa através dos experimentos realizados no LEA-UFC são apresentados em forma de gráficos. Todos os gráficos representam dados de temperaturas coletados durante 13 horas (das 5:00 às 18:00 h) dos dias 28 de março de 2018 a 02 de maio de 2018, sendo possível observar que há uma similaridade entre as curvas de temperatura dos dois módulos durante todo o dia.

Na segunda etapa, foram coletados dados de tensão e corrente dos sistemas instalados, com a finalidade de analisar além dos dados e gráficos de temperatura, os gráficos de potência instantânea, com finalidade de validar os três modelos matemáticos utilizados.

A partir dos dados coletados, utilizando os resultados do módulo instalado sobre o solo como base para comparação, foi possível fazer uma análise de ganho ou perda de geração relacionado ao módulo instalado sobre a estrutura flutuante.

O gráfico da Figura 5.9 representa os dados de geração de eletricidade e irradiação diária durante os trinta dias que os módulos foram expostos aos ambientes distintos como foi idealizado nessa pesquisa. No gráfico as colunas representam a geração de eletricidade por dia em Wh (Watt-hora).

O gráfico da Figura 5.10 representa o comparativo entre os módulos instalados sobre o solo e sobre estrutura flutuante. Os valores positivos representam um ganho de geração de eletricidade quando o módulo é instalado sobre estrutura flutuante. Os valores negativos representam uma maior geração de eletricidade do módulo instalado em solo.

Figura 5.9 – Dados de geração de eletricidade e Irradiação.

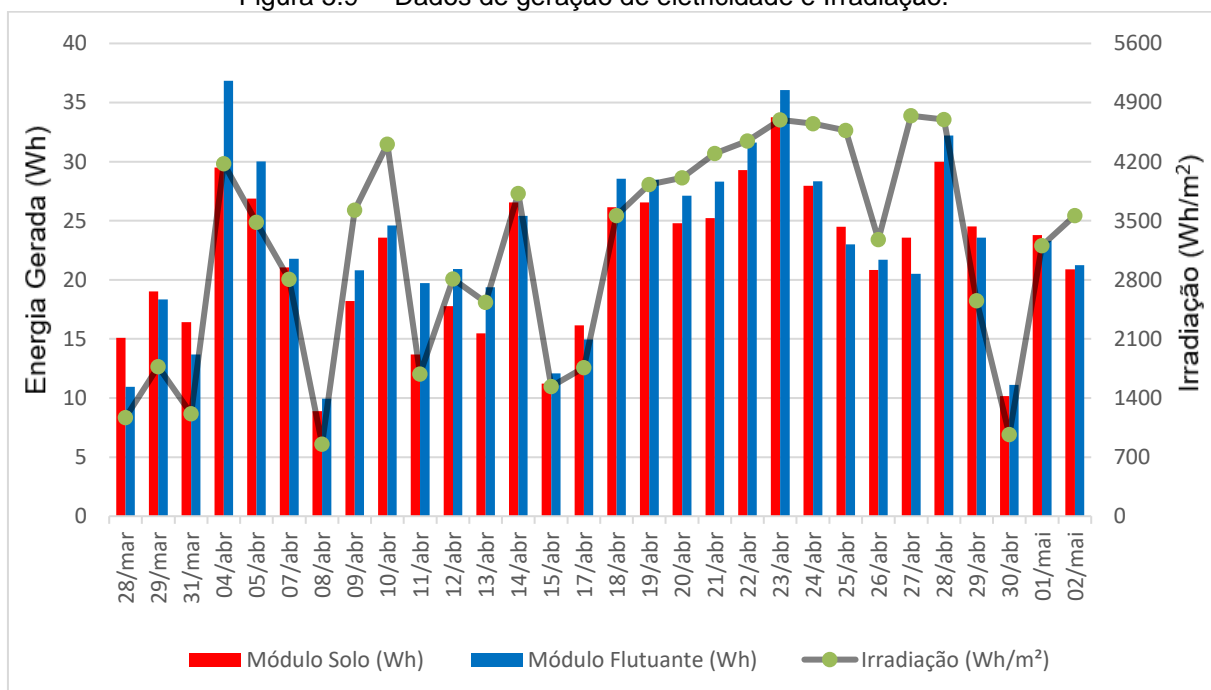
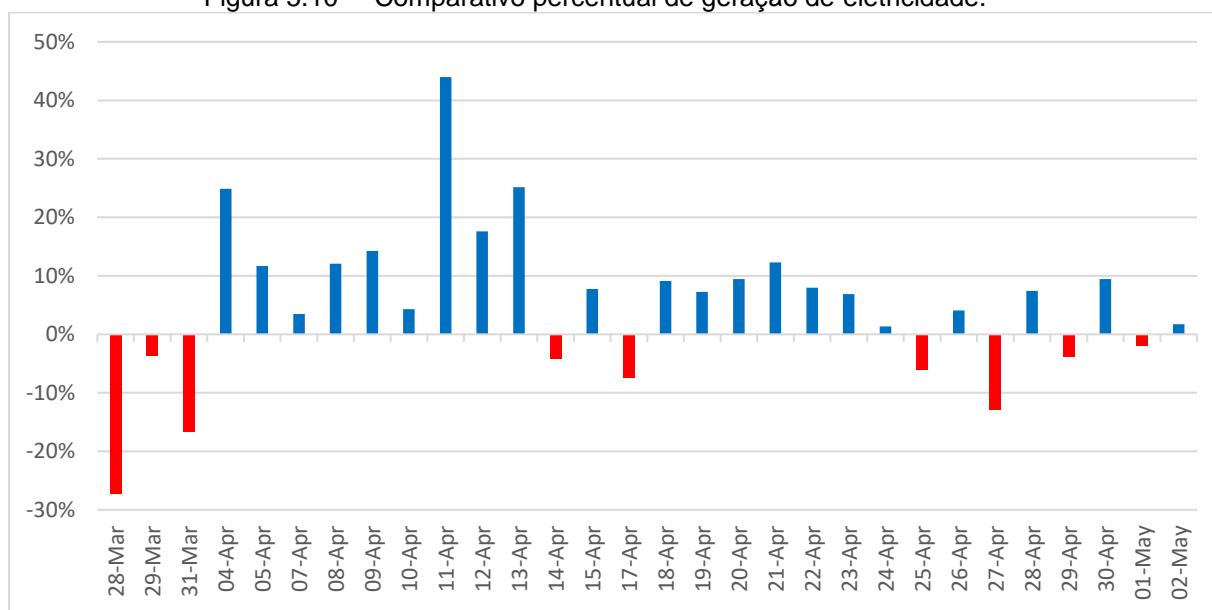


Figura 5.10 – Comparativo percentual de geração de eletricidade.



Com os valores absolutos de geração de eletricidade dos dois módulos e os percentuais relativos de comparação entre os dois tipos de instalação, foi possível avaliar o comportamento elétrico dos módulos em diferentes níveis de irradiação diária.

Como resultado da segunda etapa da pesquisa durante os 30 dias de experimento e aquisição de dados, foi possível verificar que o ganho médio foi de 5,09% na geração comparando o módulo flutuante e o módulo instalado sobre solo. A partir disso foi construída uma tabela de avaliação dos ganhos de eficiência em relação aos diferentes gradientes de irradiação diária. Esses dados estão expostos na Tabela 5.2.

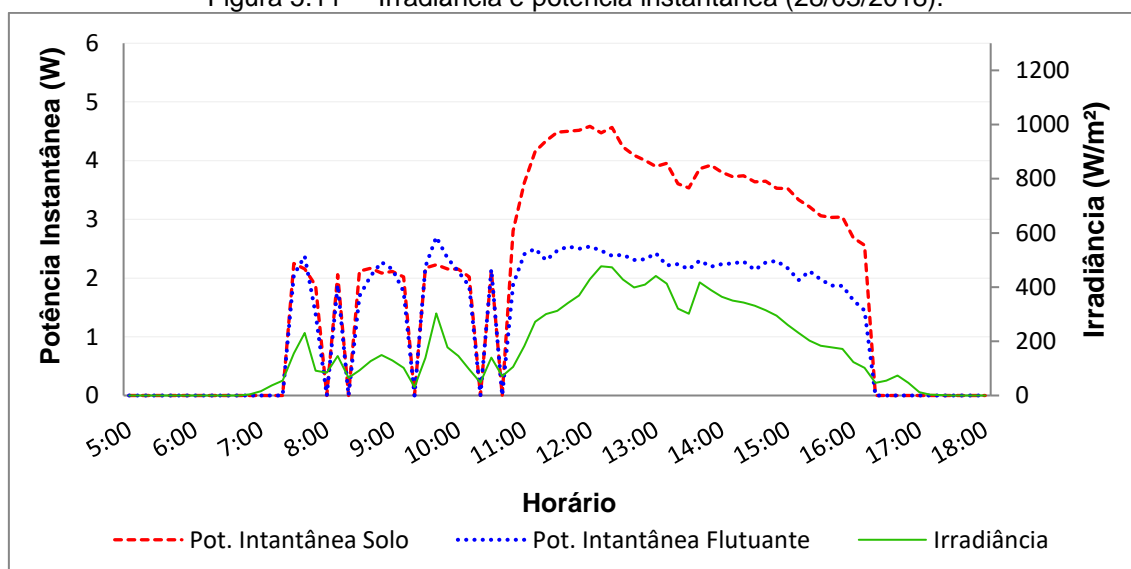
Tabela 5.2 – Variação de eficiência e irradiação.

Variação de eficiência (%)	Irradiação (kWh/m <sup>2</sup> )			% em relação ao período total
	0 – 1,8	1,8 – 3,0	>3,0	
Variação < 0%	4 dias	3 dias	2 dias	30 %
0% < Variação < 5,09%	0	1 dia	4 dias	16,67 %
Variação > 5,09%	4 dias	2 dias	10 dias	53,33 %

Varição menor que 0% indicam que o módulo instalado sobre o solo gerou mais eletricidade que o módulo flutuante. Variação entre 0% e 5,09% foram aquelas onde o módulo flutuante gerou mais que o módulo sobre solo, porém foi um valor abaixo da média dos 30 dias avaliados. E variação superior a 5,09% foram aquelas onde o módulo flutuante gerou mais que o módulo sobre solo e com valores superiores à média dos 30 dias.

A partir da Tabela 5.2 foi possível verificar que 30% dos dias apresentaram variações negativas, e que 44,45% desses piores casos ( $<0\%$ ) ocorreram durante dias com baixa irradiação. Na Figura 5.11 é possível ver o exemplo de um desses casos, no dia 28 de março de 2018, onde verificou-se uma irradiação diária de  $1,17 \text{ kWh/m}^2$ . A energia elétrica gerada pelo módulo no solo foi de  $15,08 \text{ Wh}$  e pelo módulo flutuante foi de  $10,96 \text{ Wh}$ , mostrando uma perda bruta na geração de energia elétrica de  $4,12 \text{ Wh}$  ( $-27,32\%$ ).

Figura 5.11 – Irradiância e potência instantânea (28/03/2018).



Os casos de variação positiva representaram 70% dos dias avaliados durante a pesquisa, onde 66,67% desses casos ocorreram em dias que apresentaram alta irradiação. Na Figura 5.12 é possível ver o exemplo de um desses casos, no dia 04 de abril de 2018, onde verificou-se uma irradiação diária de  $4,17 \text{ kWh/m}^2$ . A energia elétrica gerada pelo módulo no solo foi de  $29,50 \text{ Wh}$

e pelo módulo flutuante foi de 36,84 Wh, mostrando um ganho bruto na geração de energia elétrica de 7,34 Wh (24,88%).

Pôde-se então, a partir dos dados da primeira e segunda etapas, fazer uma análise comparativa utilizando como base dias que apresentaram valores próximos de irradiação, temperatura ambiente e irradiância distribuída ao longo do dia. Os valores apresentados na Tabela 5.3 apresentam o número de horas que os módulos ficaram expostos a um gradiente de temperatura, e na Tabela 5.4 são apresentados os dados de variação de eficiência.

Figura 5.12 – Irradiância e potência instantânea (04/04/2018).

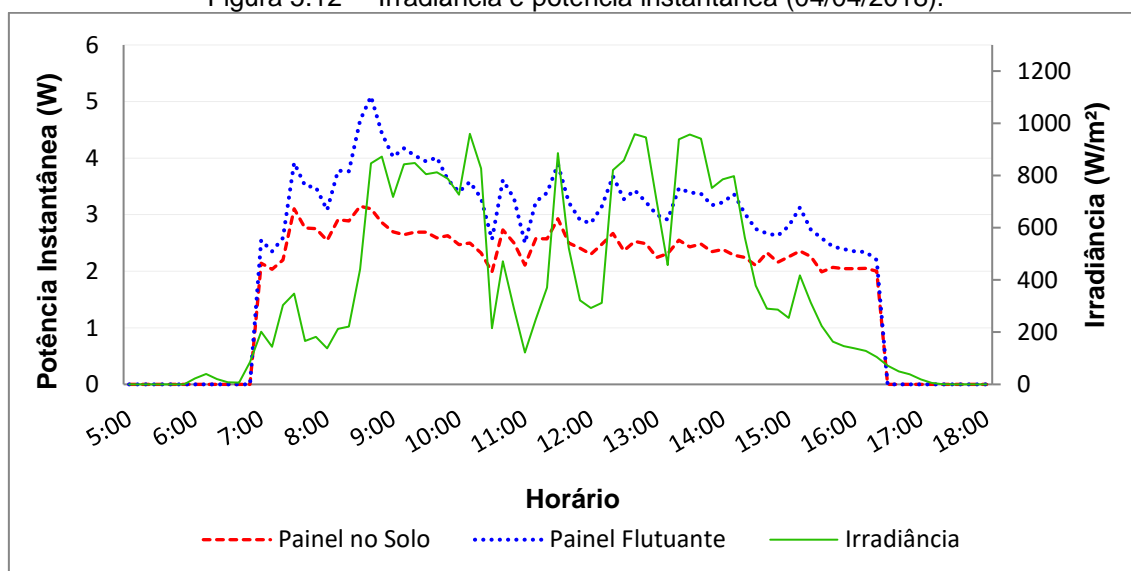


Tabela 5.3 – Comparativo primeira e segunda etapas – Temperatura.

Dia	Irradiação (kWh/m <sup>2</sup> )	$\Delta T$ máximo (°C)	Número de horas com $\Delta T > 0$
<b>1ª Etapa</b>			
17/11/2017	2,4	4,52	5:20
18/11/2017	4,2	3,44	3:00
<b>2ª Etapa</b>			
13/04/2018	2,5	4,43	8:20
21/04/2018	4,3	4,82	9:00

Tabela 5.4 – Comparativo primeira e segunda etapas – Eficiência.

Dia	$\Delta\eta_1$	$\Delta\eta_2$	$\Delta\eta_3$	$\Delta\eta_4^*$
1ª Etapa				
17/11/2017	0,34 %	0,56 %	0,32 %	-
18/11/2017	- 0,02 %	- 0,04 %	- 0,02 %	-
2ª Etapa				
13/04/2018	0,56 %	0,94 %	0,52 %	25,13 %
21/04/2018	0,99 %	1,67 %	0,92 %	12,30 %

\*Valores medidos

Na segunda etapa foi possível verificar um gradiente de temperatura semelhante ao gradiente de temperatura encontrado na primeira etapa, porém o número de horas que os módulos ficaram expostos a essa diferença de temperatura foi determinante para afetar a geração de energia elétrica dos módulos.

Observando dias com irradiação próximos, foi possível notar que com a estrutura flutuante da segunda etapa, dia 13 de abril de 2018, houve um ganho de eficiência de 25,13%, enquanto para um dia com irradiação próximo na primeira etapa, 17 de novembro de 2017, de acordo com o modelo matemático, houve ganho desprezível na eficiência do módulo flutuante, isso pode ser devido ao tempo que esse estava a uma temperatura inferior ao módulo sobre solo. O tempo de exposição a um gradiente de temperatura positivo na primeira etapa foi de 5:20 horas, enquanto na segunda etapa foi de 8:20 horas.

Da mesma maneira o dia 18 de novembro de 2017 (primeira etapa) apresentou desprezível aumento de eficiência. No dia com irradiação semelhante na segunda etapa, dia 21 de abril de 2018 foi possível constatar um ganho de 12,30% de eficiência do módulo flutuante. O tempo de exposição a um gradiente de temperatura na primeira etapa foi de 3 horas, enquanto na segunda etapa foi de 9 horas.



Os gráficos de temperatura dos dias 17/11/2017, 18/11/2017, 13/04/2018 e 21/04/2018 são apresentados respectivamente nas Figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16.

Figura 5.13 – Temperatura dos módulos FV (17/11/2017).

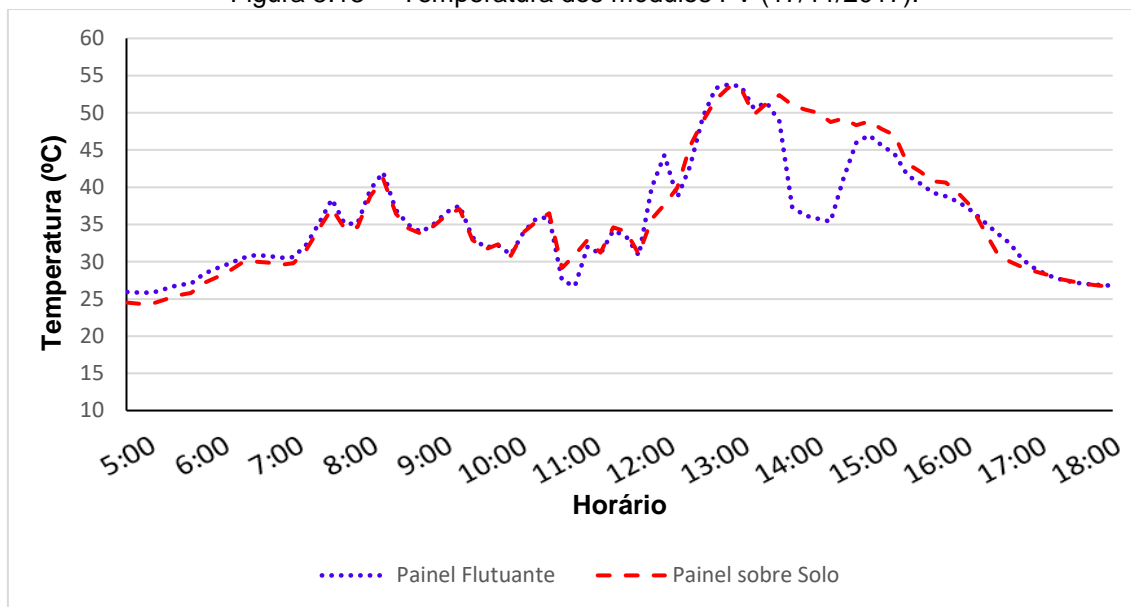


Figura 5.14 – Temperatura dos módulos FV (18/11/2017).

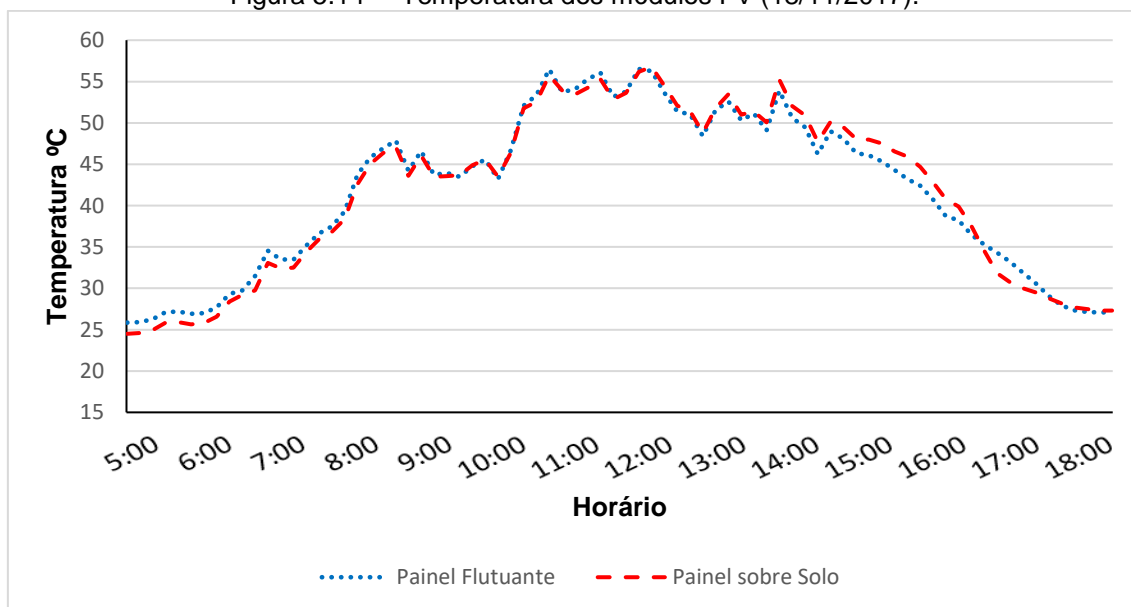


Figura 5.15 – Temperatura dos módulos FV (13/04/2018).

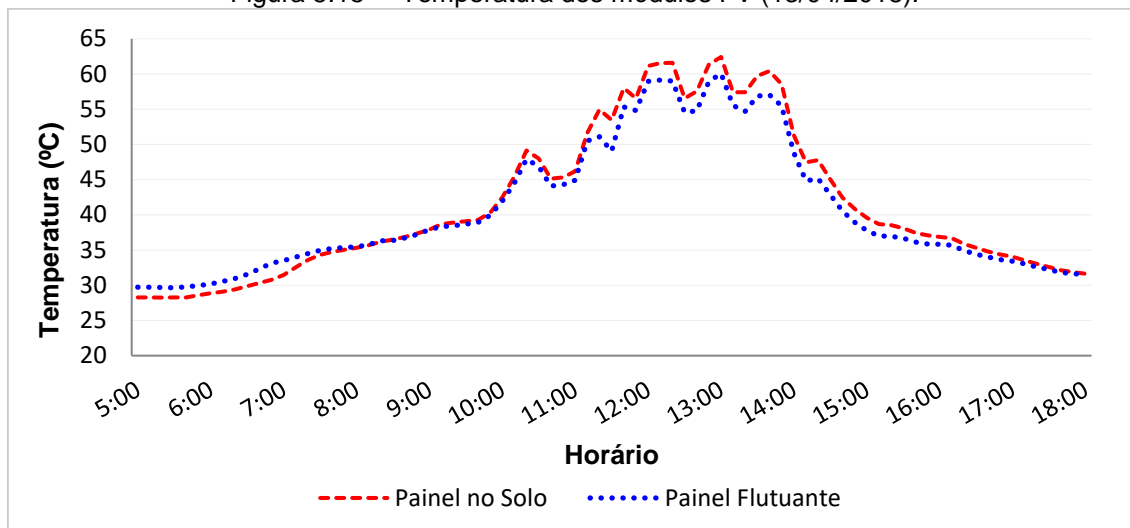
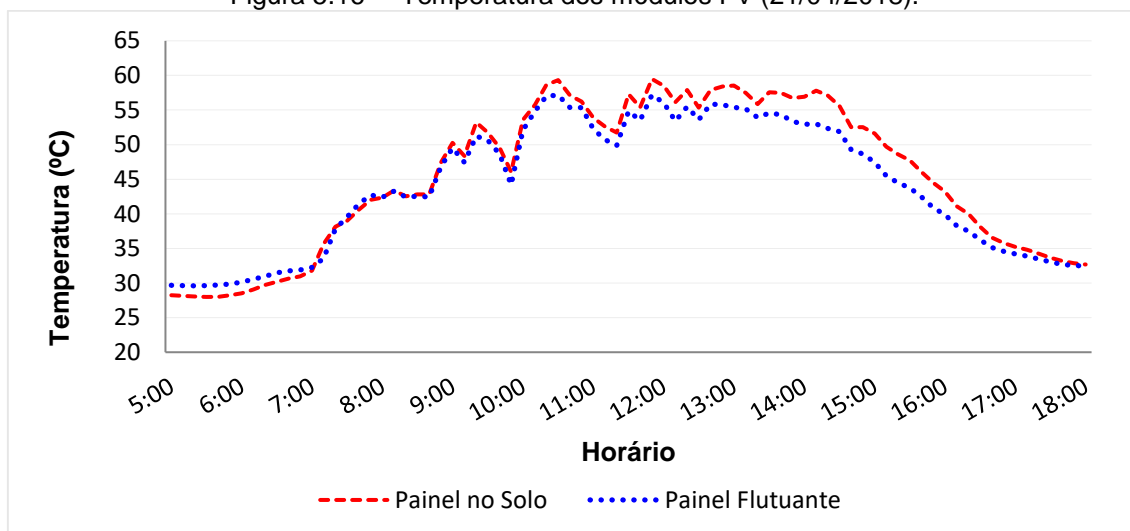


Figura 5.16 – Temperatura dos módulos FV (21/04/2018).



Os dias avaliados também apresentavam valores da distribuição da irradiância ao longo do dia e temperatura ambiente próximos. Os gráficos dos dias 17/11/2017, 18/11/2017, 13/04/2018 e 21/04/2018 são apresentados respectivamente nas Figuras 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20.

Figura 5.17 – Temperatura ambiente dias 17/11/2017 e 03/04/2018.

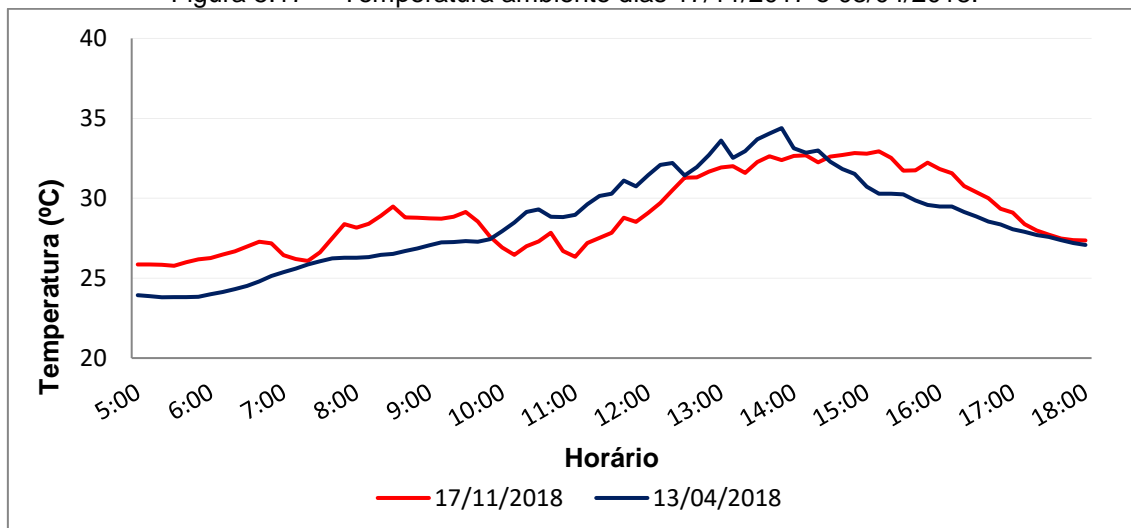


Figura 5.18 – Temperatura ambiente dias 18/11/2017 e 21/04/2018.

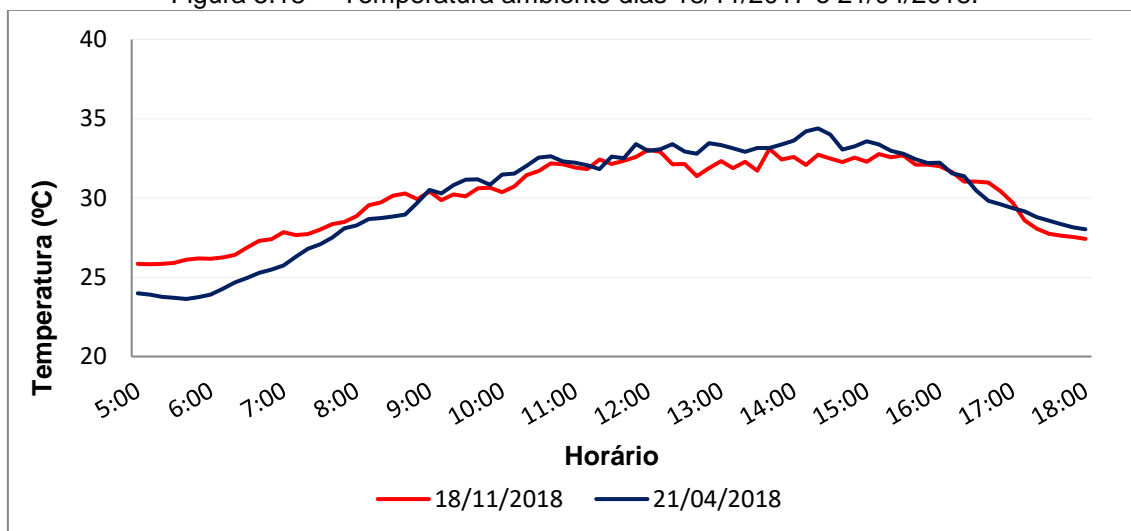


Figura 5.19 – Dados de irradiância dias 17/11/2017 e 03/04/2018.

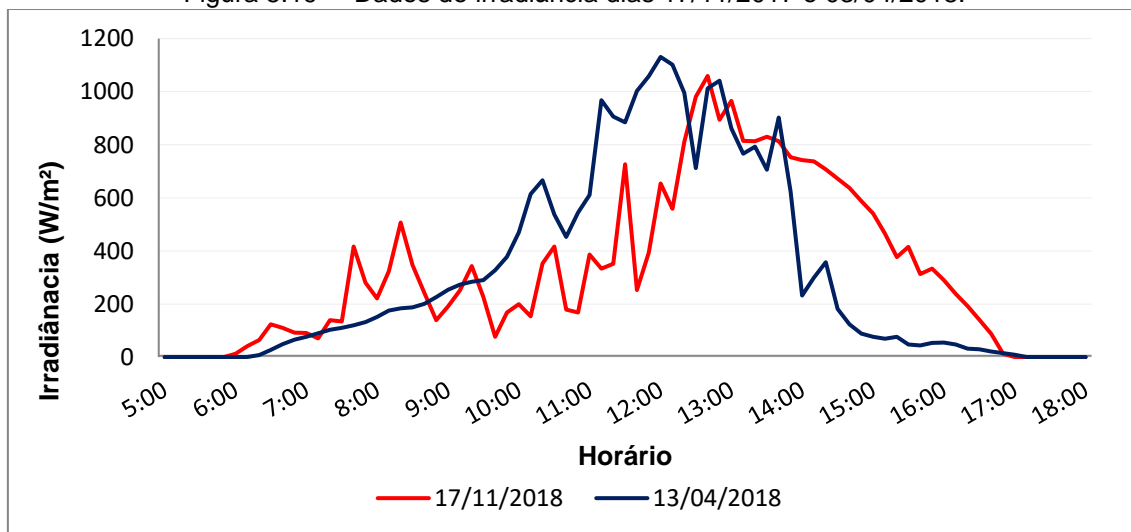
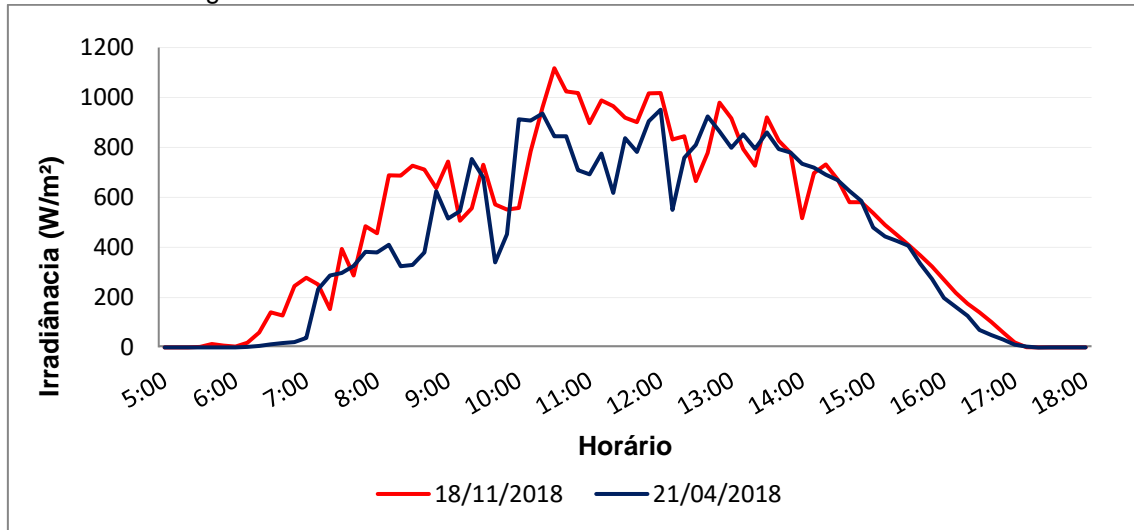


Figura 5.20 – Dados de irradiância dias 18/11/2017 e 21/04/2018.



Os dados da Tabela 5.4 apresentam valores discrepantes de resultados entre os três modelos matemáticos utilizados ( $\Delta\eta_1$ ,  $\Delta\eta_2$ ,  $\Delta\eta_3$ ) e os valores obtidos através de medições,  $\Delta\eta_4$ .

## 6. CONCLUSÃO

A presente dissertação apresentou uma avaliação da influência da temperatura sobre a geração de energia elétrica de um módulo FV instalado sobre a água em uma estrutura flutuante. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Energias Alternativas (LEA), localizado na Universidade Federal do Ceará (UFC) em Fortaleza – CE. O experimento serviu para analisar a redução da temperatura do módulo FV flutuante e conseqüentemente o aumento na eficiência de conversão, considerando as condições climáticas encontradas no semiárido nordestino.

Foram realizados dois experimentos com o uso de dois módulos FV policristalinos modelo KS20T de 20 Wp. Nas duas etapas um dos módulos ficou instalado sobre o solo e o segundo instalado sobre uma estrutura flutuante em um tanque com água.

Através da avaliação obtida nas duas etapas da pesquisa foi possível constatar que a geometria da estrutura flutuante e tempo de exposição de um módulo a uma temperatura inferior a um módulo idêntico por maior período de tempo podem afetar diretamente a eficiência elétrica do módulo e, conseqüentemente, a geração efetiva de energia elétrica.

Na primeira etapa, através de sensores e dispositivos de aquisição e coleta de dados, foi possível verificar que não houve redução significativa de temperatura do módulo FV flutuante, comparado com um módulo equivalente instalado sobre o solo, para causar aumento da eficiência da conversão energética, bem como aumento significativo na potência gerada pelo mesmo de acordo com modelo matemático utilizado.

A estrutura utilizada na segunda etapa por permitir maior fluxo de ar e maior troca de calor por convecção, apresentou melhor eficiência que a estrutura flutuante da primeira etapa. Isso foi comprovado com os dados avaliados, mostrando que mesmo apresentando gradientes de temperatura semelhantes entre os experimentos da primeira e da segunda etapa, o módulo sobre estrutura flutuante de PVC permanecia com temperatura inferior ao módulo em solo por

um tempo superior quando comparado ao tempo que o módulo sobre estrutura flutuante de isopor permanecia em menor temperatura comparado ao módulo em solo.

Utilizando como base comparativa pesquisas feitas anteriormente no LEA-UFC, verificou-se um valor inferior de ganho de geração elétrica aos valores das pesquisas realizadas por Do Sacramento (2015) e De Corrêa (2015), do módulo FV flutuante em comparação ao módulo FV sobre o solo, que obtiveram aumento médio de 9% e 8,38% respectivamente, entretanto os experimentos realizados nas duas pesquisas o módulo FV flutuante fora instalado em contato direto com a água.

Após avaliação dos resultados obtidos na pesquisa foi possível destacar alguns fatores que contribuem para a aplicação dessa tecnologia de instalação de módulos flutuantes na região do semiárido brasileiro, uma delas foi a possibilidade de aumentar a geração de energia elétrica de maneira passiva.

Outro fator diz respeito à irradiação, como foi verificado nesse trabalho, foi obtida uma variação positiva de geração de energia elétrica em 87,5% dos dias que apresentaram irradiação solar diária superior a 3 kWh/m<sup>2</sup>. Em virtude disso o uso da tecnologia pode ser estimulado nessa região do semiárido brasileiro, levando-se em consideração a média de irradiação solar diária no estado do Ceará, que é superior a 5 kWh/m<sup>2</sup>.

Os resultados obtidos confirmaram o ganho de geração de energia elétrica do módulo FV flutuante em comparação ao módulo FV sobre o solo. Esses resultados são favoráveis à aplicação da tecnologia FV flutuante e ao aumento de pesquisas relacionadas, em vista que é possível obter um aumento na geração de energia de maneira passiva e menos nociva aos módulos por evitar contato direto com a água.

Também foi possível verificar através dos dados da Tabela 5.4 que os três modelos matemáticos utilizados não foram validados para esse experimento. Os valores medidos apresentam uma grande discrepância quando comparados aos valores medidos, o que mostra que esses modelos matemáticos são

inadequados para validar dados de temperatura e eficiência na região do semiárido brasileiro.

Como proposta para trabalhos futuros:

1. Avaliação dos parâmetros utilizados nessa pesquisa e desenvolvimento de um modelo matemático específico que se adeque à região onde a pesquisa foi desenvolvida, visando um resultado com um nível de refinamento mais adequado para a realidade no semiárido brasileiro.

2. Realizar análise financeira mais abrangente com finalidade de avaliar se há uma relação favorável entre o ganho em geração de energia com o custo adicional de fabricação, instalação e manutenção de estruturas FV flutuantes.

3. Avaliação em longo prazo de degradação de equipamentos expostos a um ambiente mais nocivo (aquático).

## REFERÊNCIAS

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos, 2017. Disponível em: <[http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas\\_Brasileiro\\_Energia\\_Solar\\_2a\\_Edicao.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf)> Acesso em 27 julho 2018.

CAZZANIGA, R.; CICU, M.; ROSA-CLOT, M.; ROSA-CLOT, P.; TINA, G. M.; VENTURA, C. Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, ISSN 1364-0321, 2017.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014.

CERNE – Centro de Estratégias em Recursos Naturais & Energia. **Notícias**. 2017. Disponível em: <<http://www.cerne.org.br/noticias/>> Acesso em 04 junho 2017.

CHOI, Y. A study on power generation analysis of floating PV system considering environmental impact. **International Journal of Software Engineering and Its Applications**, v. 8, n. 1, p. 75-84, 2014.

CIEL & TERRE, **Our reference**, 2018. Disponível em: <<https://www.ciel-et-terre.net/our-floating-solar-power-plants-references/>> Acesso em 04 março 2018.

COLMENAR-SANTOS, A.; BUENDIA-ESPARCIA, A.; PALACIO-RODRÍGUEZ, C.; BORGE-DIEZ D. Water canal use for the implementation and efficiency optimization of photovoltaic facilities: Tajo-Segura transfer scenario. **In Solar Energy**, v. 126, p. 168-194, ISSN 0038-092X, 2016.



CORRÊA, R. M. C. **Modelagem e validação do uso de módulo fotovoltaico flutuante em água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

DO SACRAMENTO, E. M. **Modelo elétrico-térmico para representar o comportamento de módulos fotovoltaicos flutuantes em água a partir das condições climáticas do semiárido brasileiro**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

DO SACRAMENTO, E. M.; CARVALHO, P. C. M.; DE ARAÚJO, J. C.; RIFFEL, D. B.; DA CRUZ CORRÊA, R. M.; & PINHEIRO NETO, J. S. Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. **IET Renewable Power Generation**, v. 9, p. 1019-1024, 2015.

DUBEY, S.; SARVAIYA, J. N.; SESHADRI, B. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. **In Energy Procedia**, v. 33, p. 311-321, 2013.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em:  
<[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2017.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf)> Acesso em 27 julho 2018.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica DEA 19/14 – Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em:  
<[http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Série%Estudos%de%Energia/DEA%19%-Inserção%da%Geração%Fotovoltaica%Distribuída%no%Brasil%-Condicionantes%e%Impactos%VF%\(Revisada\).pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Série%Estudos%de%Energia/DEA%19%-Inserção%da%Geração%Fotovoltaica%Distribuída%no%Brasil%-Condicionantes%e%Impactos%VF%(Revisada).pdf)> Acesso em 04 junho 2017.

FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; FAGNANI, K. C.; DE SOUZA, T. A.; TONEZER, C.; DOS SANTOS, G. R.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, Part 1, p. 181-191, ISSN 1364-0321, 2018.

FLUKE. **Users Manual – VT02, VT04A, VT04 Visual IR Thermometer**. 2012. Disponível em: <[https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/VT0204A\\_umeng0200.pdf?\\_ga=2.227788509.1307481201.1532796590-1003418868.1532796590](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/VT0204A_umeng0200.pdf?_ga=2.227788509.1307481201.1532796590-1003418868.1532796590)>, Acesso em 03 de outubro de 2017.

GALDINO, M. A.; OLIVIERI, M. M. A. Some Remarks about the Deployment of Floating PV Systems in Brazil. **Journal of Electrical Engineering**, p. 10-19, 2017.

GERRA, J. B. S. O. A.; DUTRA, L.; SCHWINDEN, N. B. C.; DE ANDRADE, S. F. Future scenarios and trends in energy generation in Brazil: supply and demand and mitigation forecasts. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 197-210, 2014.

HUKSEFLUX. **LP02 Pyranometer**. Disponível em: <<http://www.hukseflux.com/product/lp02-pyranometer>>. Acesso em: 28 out. 2017.

KO, L.; WANG, J.; CHEN, C.; TSAI, H. Evaluation of the development potential of rooftop solar photovoltaic in Taiwan. **In Renewable Energy**, v. 76, p. 582-595, ISSN 0960-1481, 2015.

KYOCERA SOLAR, **Solartec KS20T high efficiency polycrystalline photovoltaic module**. Disponível em: <<https://www.kyocerasolar.com/dealers/product-center/archives/spec-sheets/Solartec-KS20.pdf>>, Acesso em 03 de outubro de 2017.

LEE, Y. G.; JOO, H. J.; YOON, S. J. Design and installation of floating type photovoltaic energy generation system using FRP members. **Solar Energy**, v. 108, p. 13-27, ISSN 0038-092X, 2014.

MINISTRÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Hidrelétrica Balbina inicia projeto com flutuadores para gerar energia solar**. 2016 Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/hidreletrica-balbina-inicia-projeto-com-flutuadores-para-gerar-energia-solar](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/hidreletrica-balbina-inicia-projeto-com-flutuadores-para-gerar-energia-solar)> Acesso em 10 de novembro de 2017

MITTAL, D.; SAXENA, B. K.; RAO, K. V. S. Floating solar photovoltaic systems: An overview and their feasibility at Kota in Rajasthan. **International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)**, Kollam, p. 1-7, 2017.

MUSCAT, Melanie. **A Study of Floating PV Module Efficiency**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia Sustentável) – Institute for Sustainable Energy, University of Malta, Malta, 2014.

OMEGA ENGINEERING BRASIL. **Sensores Pt-100**. Disponível em: <<http://br.omega.com/prodinfo/pt100.html>>. Acesso em: 10 out. 2017.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R. ABREU, S. L. RÜTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.

QSI – Engenharia Elétrica. **Primeiro projeto de usina solar flutuante é inaugurado no Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://www.qsi.eng.br/primeiro-projeto-de-usina-solar-flutuante-e-inaugurado-no-brasil>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

RAM J. P.; MANGHANI, H.; PILLAI, D. S.; BABU, T. S.; MIYATAKE, M.; RAJASEKAR, N. Analysis on solar PV emulators: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, Part 1, p. 149-160, ISSN 1364-0321, 2018.

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21th century. **GSR 2017** Infographics, 2017. Disponível em: <<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>> Acesso em 03 maio 2017.

SAHU, A.; YADAV, N.; SUDHAKAR, K. Floating photovoltaic power plant: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 815-824, 2016.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590-601, ISSN 1364-0321, 2017.

SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO – SÃO PAULO. **São Paulo coloca em operação a primeira usina solar flutuante do Brasil**, 2016. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/2016/09/sao-paulo-coloca-em-operacao-primeira-usina-solar-flutuante-do-brasil/>> Acesso em 30 setembro 2017.

SOLAR ASSET MANAGEMENT ASIA. **Top 70 floating solar PV plants**, 2018. Disponível em: < <https://solarassetmanagement.asia/news/top-70-floating-solar-pv-plants/>> Acesso em 15 fevereiro 2018.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. **Solar Energy**, v. 83, n. 5 , p. 614-624, 2009.

TALARI, S.; SHAFIE-KHAH, M.; OSÓRIO, G. J.; AGHAEI, J.; CATALÃO J. P.S. Stochastic modelling of renewable energy sources from operators' point-of-view: A survey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, ISSN 1364-0321, 2017.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

TRAPANI, K.; SANTAFÉ, M. R. A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 23, n. 4, p. 524-532, 2015.

## APÊNDICE

### **Apêndice A – Trabalhos científicos gerados.**

Artigo publicado em congresso:

[1] ALENCAR FILHO, A. A. R.; CARVALHO, P. C. M.; DUPONT, I. M.

**Influência da distância de painéis fotovoltaicos em relação à água sobre a eficiência energética.** VII Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS), Gramado, 2018.