

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

ANÁLISE DE SISTEMA HÍBRIDO SOLAR: FOTOVOLTAICO E TÉRMICO

Autora: Nadja Cardoso Campos Ribeiro
Orientador: Prof. Dr. Augusto César de Mendonça Brasil

Brasília, DF
2016



Nadja Cardoso Campos Ribeiro

**ANÁLISE DE SISTEMA HÍBRIDO SOLAR:
FOTOVOLTAICO E TÉRMICO**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Augusto César de Mendonça Brasil

Brasília, DF

2016

Nadja Cardoso Campos Ribeiro

ANÁLISE DE SISTEMA HÍBRIDO SOLAR: FOTOVOLTAICO E TÉR-
MICO/ Nadja Cardoso Campos Ribeiro. – Brasília, DF, 2016-
34 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Augusto César de Mendonça Brasil

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2016.

1. Energia Solar. 2. Sistemas Híbridos. I. Prof. Dr. Augusto César de
Mendonça Brasil. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV.
ANÁLISE DE SISTEMA HÍBRIDO SOLAR: FOTOVOLTAICO E TÉRMICO

CDU 02:141:005.6

Nadja Cardoso Campos Ribeiro

ANÁLISE DE SISTEMA HÍBRIDO SOLAR: FOTOVOLTAICO E TÉRMICO

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 30 de novembro de 2016:

**Prof. Dr. Augusto César de Mendonça
Brasil**
Orientador

**Prof. Dr.: Fábio Alfaia da Cunha,
UnB/ FGA**
Convidado 1

**Prof. Dr.: Jorge A. Cormane
Angarita, UnB/ FGA**
Convidado 2

Brasília, DF
2016

Dedico este trabalho a meus pais, Elâine e Hilmar e à minha irmã, Hilmara. Sem vocês nada seria.

AGRADECIMENTOS

A meus pais por acreditarem em mim, pelo apoio, amor e força.

À minha irmã, por sempre torcer por mim mesmo distante, e por comemorar comigo cada conquista como se fosse sua.

Às amigas que construí ao longo destes cinco anos de UnB, pelo apoio, companhia e paciência, especialmente àqueles que acompanharam minha caminhada na realização deste trabalho.

A meu professor, Augusto Brasil, pela paciência e por me mostrar o caminho a seguir.

A todo corpo docente da UnB Gama, por todo o conhecimento compartilhado.

E a todas as pessoas que de alguma forma estiveram presentes e me ajudaram na conclusão deste trabalho, o meu muito obrigada!

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente e com o futuro do planeta fizeram com que a busca por fontes de energias renováveis e de menor impacto ambiental aumentasse nas últimas décadas. Dentre elas destaca-se a energia solar, por ser uma fonte renovável, abundante e limpa. A energia proveniente do Sol pode ser utilizada de diversas maneiras, dentre elas a geração direta de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos, e a geração de energia térmica, devido ao calor produzido pela radiação solar. O presente trabalho analisa um sistema híbrido solar que une em um sistema a produção de energia elétrica através de um módulo fotovoltaico, com o aquecimento de água para uso doméstico. Neste sistema, a água é aquecida através do calor retirado do módulo, o que também ajuda a aumentar a eficiência elétrica, já que painéis solares apresentam redução em seu rendimento quando operam em altas temperaturas. Para isto, foi montado um modelo do sistema, e variáveis como temperatura de entrada e saída da água, potência elétrica, temperatura ambiente e temperatura da superfície do painel foram medidas a fim de caracterizar o comportamento do mesmo. Ao realizar as medições foi possível concluir que a eficiência total do sistema é de aproximadamente 30%, valor consideravelmente baixo, o que dificulta sua viabilidade técnica. Parte disso deve-se ao caráter experimental da coleta de dados e à escala em que o modelo foi feito. Devido às diferenças de projeto entre o sistema de Dublin e o de Brasília, a eficiência de Dublin mostrou-se melhor, apesar de o clima de Brasília ser mais favorável para a instalação de sistemas híbridos solares.

Palavras-chaves: Energia Solar, Sistemas Híbridos, Energia Térmica.

ABSTRACT

The concerns regarding the environment and the future of the planet have made the search for renewable and low impact sources of energy to increase on the past decades. Among them stands out solar energy, for being a renewable, abundant and clean source of energy. The energy that comes from the Sun have different uses and between them are the generation of electric power through photovoltaic panels and the thermal power generation, due to the heat produced by the solar radiation. This paper analyses a hybrid solar system that combines in a single system the production of electric power through a photovoltaic module with the heating of water for domestic use. In this system, water is heated through the heat removed from the photovoltaic module, which also helps to increase its electrical efficiency, since photovoltaic panels lose its efficiency when operating at high temperatures. In order to prove this, a prototype was designed and measurements of variables such as inlet and outlet water temperature, electric power output, air temperature and front panel temperature were taken with the aim of characterizing its behavior. By performing the measurements, it was possible to conclude that the global efficiency of the system is approximately 30%, value that can be considered relatively low, which hinders its technical viability. Part of this happened due to the experimental nature of data collection and the small dimensions of the prototype. Due to the design differences between the system made in Dublin and Brasília, the global efficiency in Dublin proved to be better, although Brasília's climate proved to be more favourable for the installation of hybrid solar systems.

Key-words: Solar Energy, Hybrid Systems, Thermal Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Média anual da radiação solar global diária no Brasil ($\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$).	2
Figura 2 – Camadas de um módulo fotovoltaico.	7
Figura 3 – Simulação de diferentes configurações de coletores.	9
Figura 4 – Esquema do trocador de calor utilizado em Dublin.	15
Figura 5 – Foto do fundo do painel, com o trocador de calor instalado.	17
Figura 6 – Esquema do sistema criado.	18
Figura 7 – Radiação solar para os três dias de realização do experimento.	22
Figura 8 – Temperatura ambiente para os três dias de realização do experimento.	22
Figura 9 – Potência elétrica produzida nos três dias de medição.	23
Figura 10 – Potência elétrica e potência para o sistema PV - 15/10.	24
Figura 11 – Potência elétrica e potência para o sistema PV - 05/11.	24
Figura 12 – Relação entre eficiência elétrica e temperatura de superfície.	25
Figura 13 – Radiação solar em Brasília e Dublin ao longo do ano.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades das camadas constituintes do módulo solar.	14
Tabela 2 – Especificações painel solar Yingli STP-020-17b.	16
Tabela 3 – Comparativo das potências, radiação e temperatura ambiente nos três dias de medição.	23
Tabela 4 – Comparação dos dados obtidos com o painel solar e sistema híbrido, para Brasília.	26
Tabela 5 – Comparação dos dados obtidos com o painel solar e sistema híbrido, para Dublin.	27
Tabela 6 – Comparação de alguns dos dados obtidos em Brasília e Dublin.	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
BIG	Banco de Informações de Geração
BiPV	Building Integrated Photovoltaic
DF	Distrito Federal
EPIA	European Photovoltaic Industries Association
Eq.	Equação
EVA	Etileno-vinil-acetato
FGA	Faculdade UnB Gama
Fig.	Figura
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOCT	Temperatural Nominal de Operação da Célula
PET	Polietileno-tereftalato
PV	Photovoltaic
PVT	Photovoltaic/thermal
Tab.	Tabela
UnB	Universidade de Brasília

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_i	Calor útil disponível
G_t	Irradiação solar
A_s	Área de superfície
U_L	Coefficiente global de perda de calor
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
L_{vidro}	Espessura do vidro
k_{vidro}	Condutividade térmica do vidro
L_{EVA}	Espessura do EVA
k_{EVA}	Condutividade térmica do EVA
L_{Si}	Espessura do silício
k_{Si}	Condutividade térmica do silício
L_{tedlar}	Espessura do tedlar
k_{tedlar}	Condutividade térmica do tedlar
L_{PET}	Espessura do PET
k_{PET}	Condutividade térmica do PET
L_{Al}	Espessura do alumínio
k_{Al}	Condutividade térmica do alumínio
L_{Cu}	Espessura do cobre
k_{Cu}	Condutividade térmica do cobre
w	Velocidade do vento
T_s	Temperatura de superfície do painel
T_∞	Temperatura ambiente
Q_0	Taxa de perda de calor
Q_u	Taxa de energia transformada em calor

\dot{m}	Fluxo mássico da água
c_p	Calor específico
T_f	Temperatura de saída da água no coletor
T_i	Temperatura de entrada da água no coletor
η_T	Eficiência térmica
η_E	Eficiência elétrica
V	Tensão produzida pelo módulo
I	Corrente produzida pelo módulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.1.1	Objetivo Geral	3
1.1.2	Objetivo Específico	3
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	ENERGIA SOLAR	5
2.1.1	Conceitos	5
2.1.2	Energia Solar Térmica	5
2.1.3	Energia Solar Fotovoltaica	6
2.1.4	Sistemas Híbridos	7
2.2	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	10
3	METODOLOGIA	13
3.1	EQUAÇÕES	13
3.2	ESTUDO DE CASO: DUBLIN	15
3.3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	16
3.3.1	Montagem do Sistema	16
3.3.2	Coleta de Dados	18
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
4.1	DADOS COLETADOS	21
4.2	COMPARAÇÃO: BRASÍLIA E DUBLIN	27
4.2.1	Resultados obtidos em Dublin	27
4.2.2	Comparação	28
5	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

A preservação do meio ambiente e o futuro do planeta são temas cada vez mais discutidos na atualidade. O aumento da emissão de gases poluentes, a destruição de ecossistemas e a redução das reservas de combustíveis fósseis fizeram com que o termo sustentabilidade se tornasse cada vez mais presente na vida do ser humano. Com isso, cada vez mais surgem maneiras de tentar reduzir o impacto causado ao meio, e a utilização de fontes de energias renováveis têm sido solução para substituir as energias não renováveis.

A energia solar fotovoltaica é um promissor tipo de energia renovável por usar o Sol como meio para geração de energia elétrica. Ela funciona pelo princípio fotovoltaico, onde a radiação que incide nos módulos é convertida em corrente elétrica, gerando assim energia.

O Brasil por ser um país de dimensões continentais possui diversos climas, ecossistemas e tipos de relevo, o que permite instalação de diferentes tipos de energia, de acordo com o que for mais propício para a região em questão. Diversificar a matriz energética e reduzir a dependência da energia hidráulica são fatores importantes para a segurança do abastecimento de energia elétrica no país.

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2016 (EPE, 2016), 64% da oferta interna de energia elétrica é proveniente de hidrelétricas. Apesar de ser uma fonte renovável de energia, a dependência do país em uma única fonte pode gerar crise no setor energético, principalmente em anos em que o índice pluviométrico fica abaixo da média como ocorreu em 2015.

Segundo o Banco de Informações de Geração da ANEEL –BIG (ANEEL, 2016) o Brasil possui no total 4584 empreendimentos de geração de energia em operação, totalizando 147.873.369kW de potência instalada, porém destes, apenas 41 empreendimentos são centrais geradoras solar fotovoltaica, totalizando apenas 0,02% da potência instalada do país. Contudo, o Atlas Brasileiro de Energia Solar (INPE, 2006) aponta para um grande potencial de aproveitamento de energia solar no Brasil, com o menor valor de média anual de radiação global de 4,25kWh/m² e valor máximo de 6,5kWh/m².

A Associação Europeia das Indústrias Fotovoltaicas (EPIA), em seu panorama do mercado global para energia solar de 2015, mostrou que o mercado fotovoltaico atingiu a marca de 40GW de potência instalada no mundo em 2014. A China, os Estados Unidos e Alemanha são alguns dos países que mais contribuem atualmente com estes números, comprovando a viabilidade e eficiência da energia solar fotovoltaica, mesmo em países em que a radiação solar não é tão alta quanto em países tropicais, como o Brasil (EPIA, 2015).

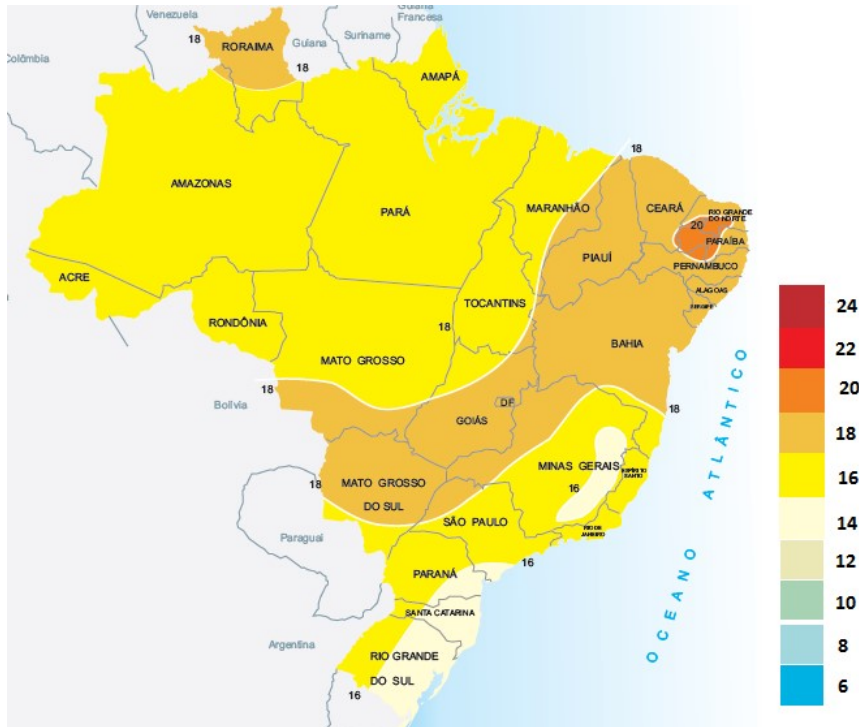


Figura 1 – Média anual da radiação solar global diária no Brasil (MJ/m².dia).

Fonte: Adaptado do Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000.

Com o crescimento global do mercado de energia fotovoltaica, espera-se que o Brasil apresente também aumento na potência instalada deste tipo de tecnologia. No entanto, tal crescimento ainda está longe de ser comparado com a difusão da tecnologia em países como Alemanha e China, e parte disso é devido ao alto investimento necessário para a instalação. Dados da Associação Europeia das Indústrias Fotovoltaicas (EPIA, 2015) mostram que apesar de ainda ser uma tecnologia cara, os preços estão em constante redução nos últimos anos. Como exemplo, para sistemas instalados em larga escala (produção acima de 1MW) o preço dos módulos chega a estar abaixo de um euro para cada Watt instalado, o que deixa a tecnologia mais visível devido ao aumento da viabilidade financeira, tornando assim mais competitiva com outros tipos de energia devido ao custo benefício e a fatores ambientais, já que quando comparado com uma hidrelétrica, por exemplo, uma usina fotovoltaica não inunda áreas e não destrói ecossistemas.

A energia solar térmica é outro tipo de energia proveniente do Sol, e baseia-se no princípio de utilizar o calor gerado pelo Sol para aquecer um fluido e transformá-lo em energia. Existem diversos tipos de utilização deste tipo de energia, no entanto o que será abordado dentro deste tema será a utilização do calor do Sol para o aquecimento de água para uso residencial.

O mercado mundial de aquecedores solares começou a crescer a partir da década de 1970 e expandiu significativamente a partir da década de 1990 (ELETROBRÁS, 2012). Como consequência, as aplicações deste tipo de tecnologia aumentaram e atualmente os

principais usos de aquecedores solares no Brasil são para uso em piscinas e em residências. Ainda de acordo com a Eletrobrás, o mercado brasileiro de aquecimento solar apresentou um crescimento sólido de aproximadamente 20% ao ano nos últimos 30 anos. Além de ser uma fonte renovável, este tipo de sistema oferece vantagens para o usuário por gerar economia na conta de energia elétrica, e traz vantagens para o sistema elétrico nacional, já que os chuveiros elétricos estão presentes em grande parte das residências do país e estes consomem muita energia. Sendo assim, quanto mais coletores solares forem instalados, menores serão os investimentos necessários em geração e transmissão de energia.

A utilização de um sistema híbrido solar fotovoltaico e térmico é uma ideia que além de unir dois sistemas em apenas um, reduz a área necessária para instalação, e reduz a quantidade de matéria prima utilizada, já que apenas um módulo fotovoltaico pode ser utilizado tanto para produzir energia como para aquecer a água.

Este trabalho visa analisar a viabilidade técnica de instalação de um sistema híbrido solar fotovoltaico e solar térmico (PVT), de modo a produzir energia elétrica e simultaneamente aquecer água para uso doméstico. A utilização da tubulação no fundo do painel solar além de aquecer a água para uso, também ajuda a reduzir a temperatura dos módulos e isso permite o aumento da eficiência elétrica do sistema, já que quando a temperatura das células solares ultrapassa o valor médio de 50°C, elas operam com eficiências mais baixas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica da implementação de um sistema solar híbrido composto de painel fotovoltaico aproveitado como sistema de aquecimento de água para uso doméstico, comparando os valores medidos para o sistema já existente em Dublin com os resultados obtidos do sistema criado em Brasília.

1.1.2 Objetivo Específico

- Montar um modelo do sistema híbrido a ser estudado;
- Através do modelo, medir os parâmetros que influenciam o desempenho do sistema, e analisar como estes alteram os resultados obtidos;
- Comparar os resultados de Brasília com os resultados obtidos em Dublin;

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos:

O primeiro capítulo trata da introdução ao tema a ser abordado, bem como os objetivos do trabalho, a metodologia utilizada para a realização do mesmo, além da estrutura adotada para a elaboração do documento.

O segundo capítulo apresenta a teoria necessária para entender alguns conceitos a serem abordados no desenvolvimento do trabalho, assim como revisão bibliográfica do que existe de pesquisa na área de sistemas híbridos solares.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada para a realização do experimento, os procedimentos utilizados para a coleta de dados e as equações utilizadas para determinar a transferência de energia do Sol para a placa fotovoltaica e para a água, assim como equações para determinar a eficiência térmica e elétrica.

O quarto capítulo mostra os resultados obtidos com a medição das variáveis, bem como as discussões cabíveis ao estudo e a comparação com os resultados obtidos através das medições no sistema já existente em Dublin.

Por fim, o quinto capítulo conclui o que foi observado durante a realização de todo o trabalho, desde a pesquisa no Trabalho de Conclusão de Curso I, até os resultados obtidos no capítulo IV deste documento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA SOLAR

O Sol é a principal estrela do sistema Solar. Por possuir massa e energia muito maiores que as dos demais planetas do sistema, ele faz com que todos os outros corpos girem ao seu redor devido ao forte campo magnético que possui.

A luz visível produzida pelo Sol é proveniente de elétrons que reagem com átomos de hidrogênio. De acordo com dados da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA, 2016), para cada metro quadrado de superfície da Terra diretamente exposta ao Sol, são depositados aproximadamente 1368 Joules de energia a cada segundo. No entanto, tal energia é em parte dissipada antes de chegar na superfície terrestre pela atmosfera, e um dos desafios da atualidade é descobrir como utilizar tal potencial energético a nosso favor, seja armazenando, produzindo calor ou energia elétrica.

2.1.1 Conceitos

A radiação solar é um tipo de radiação eletromagnética que se propaga a uma velocidade de 300.000km/s que ocupa uma faixa espectral de $0,1\mu\text{m}$ a $5\mu\text{m}$, podendo-se observar aspectos ondulatórios e corpusculares. (CRESESB, 2006).

Na superfície terrestre, a radiação solar chega de duas maneiras: como radiação direta, que é aquela que vem diretamente do Sol sem sofrer nenhum tipo de desvio devido à reflexão e difusão, ou como radiação difusa, que chega à Terra depois de passar por mudanças em sua direção após passar pela atmosfera. Além disso, se a superfície que recebe os raios solares estiver inclinada em relação à horizontal, parte da radiação poderá ser refletida pelo ambiente. O coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado albedo (CRESESB, 2006).

A energia que determinado local da Terra recebe do Sol varia devido à alternância entre dias e noites, entre estações do ano e devido à mudanças climáticas como períodos chuvosos e nublados. Portanto, são vários os fatores que influenciam a quantidade de energia solar recebida por determinada região, o que dificulta a dependência apenas na energia solar como fonte energética, levando em conta a tecnologia existente.

2.1.2 Energia Solar Térmica

A energia solar térmica é uma forma de utilizar a energia proveniente do Sol como calor. Existem diversas aplicações para este tipo de energia, desde o uso do calor do Sol

para aquecimento de água para uso doméstico e em piscinas, até em grandes usinas que utilizam a energia do Sol para concentrar calor em uma torre, gerando vapor e assim produzindo energia.

Coletores solares são uma espécie de trocadores de calor que absorvem a energia do Sol como temperatura, que é transferida para um fluido que passa pelo coletor (KALOGIROU, 2004). O fluido de trabalho neste caso varia de acordo com o tipo de painel utilizado. Geralmente são utilizados água, óleo, ar ou misturas.

2.1.3 Energia Solar Fotovoltaica

A energia fotovoltaica é um tipo de tecnologia que gera corrente contínua a partir de semi-condutores quando estes são iluminados por fótons. Enquanto houver luz iluminando a célula solar, ela produzirá energia elétrica (MME, 2008). Tal geração de energia é explicada pelo efeito fotovoltaico.

A conversão de fótons em energia foi descoberta pelo cientista francês Edmond Becquerel em 1839, que observou que quando há incidência de luz em um eletrodo mergulhado em uma solução eletrolítica, há geração de energia elétrica. No entanto, apenas em 1954 cientistas conseguiram desenvolver o primeiro protótipo de célula fotovoltaica, capaz de converter luz em eletricidade suficiente para alimentar equipamentos elétricos (MME, 2008). Entre as décadas de 1950 e 1970, iniciaram-se pesquisas intensivas na área, especialmente para aplicações espaciais. No entanto, a maior mudança foi produzida a partir dos anos 1970, motivada principalmente pela crise energética internacional, o que promoveu a pesquisa e o desenvolvimento da energia fotovoltaica como fonte energética (ONU, 2013).

Uma típica célula solar possui como material base o silício, um metal semicondutor que possui quatro elétrons que se ligam aos elétrons dos átomos vizinhos, e que assim formam uma rede cristalina. Quando exposta a fótons, ocorrerá na célula a geração de pares elétron-lacuna, que geram uma corrente elétrica através da junção. Se as duas extremidades da célula forem conectadas por um fio, haverá circulação de elétrons (CRESESB, 2006).

Existem diversos tipos de células que convertem a energia do Sol em energia elétrica. No entanto, as mais utilizadas e comercializadas atualmente são as de silício monocristalino e as de silício policristalino. Estas, quando agrupadas em série formam um módulo fotovoltaico. A quantidade de células por módulo varia de acordo com a potência elétrica da placa, e com o fabricante.

Basicamente, os painéis fotovoltaicos são compostos por uma camada de vidro temperado com camada anti-refletora para dar resistência ao painel, para protegê-lo e para aumentar sua eficiência térmica, seguido por uma camada de Etileno-Vinil-Acetato

(EVA), um material plástico utilizado para proteger a camada que vem a seguir que são as células de silício. Outra camada de EVA vem após a camada de silício, seguido por uma camada de Tedlar- polietileno tereftalato, que formam um plástico que tem função de ser uma barreira contra umidade, e para finalizar, uma camada de alumínio para isolar a placa e dar rigidez. Os módulos geralmente são revestidos por uma moldura de alumínio para dar resistência e proteger o painel (ARCURI; REDA; SIMONE, 2014).

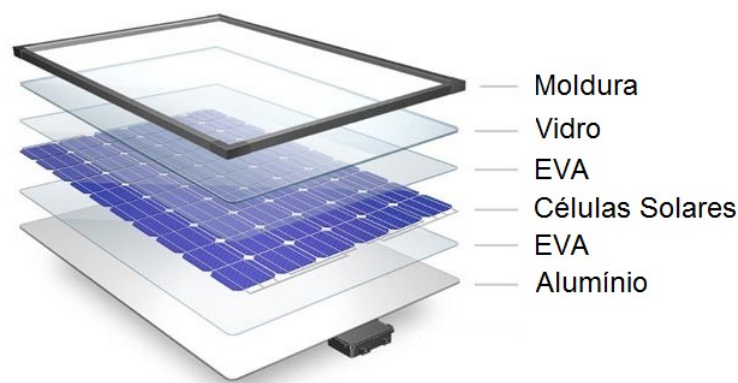


Figura 2 – Camadas de um módulo fotovoltaico.

Fonte: adaptado de Wealth Daily.

2.1.4 Sistemas Híbridos

Um sistema híbrido é visto como uma tecnologia que engloba duas diferentes funções em apenas um equipamento. Um sistema PVT é uma combinação de componentes que convertem parte da energia proveniente do Sol em eletricidade, e parte em calor que aquece um fluido de trabalho.

Um módulo fotovoltaico converte entre 4 e 17% da radiação solar incidente em energia elétrica (LISBOA, 2010). Isto significa que além das perdas por reflexão, mais de 50% da radiação é perdida em forma de calor para a célula, o que pode levar a altas temperaturas de operação do módulo. Como consequência, a célula perde aproximadamente 0,4% de eficiência para cada °C acima de sua temperatura máxima de operação. Além disso, as altas temperaturas podem causar danos permanentes na estrutura das células se a tensão causada pelo calor permanecer por longos períodos (CHOW, 2010).

Os primeiros estudos sobre a tecnologia PVT foram documentados no começo da década de 1970, onde pesquisadores apresentaram a idéia do uso de água ou ar como o fluido de resfriamento de painéis fotovoltaicos (CHOW, 2010).

Bhargava, Garg e sua equipe de trabalho desenvolveram estudos analíticos e experimentais detalhados em sistemas híbridos PVT com ar e outros fluidos do final da década de 1980 até o final da década de 1990. Nestes estudos, concluiu-se que em termos de performance total, coletores com dois vidros de isolamento são melhores que os de

apenas um vidro, apesar de serem mais caros (BHARGAVA; GARG; AGARWAL, 1991; CHOW, 2010).

Bergene e Lovvik em 1995 propuseram um modelo detalhado de um coletor PVT com água para avaliação de performance. Neste estudo, a eficiência total do sistema ficou entre 60% e 80%. Além disto, em seus estudos foi mostrado que fatores como a quantidade de água no tanque de armazenamento influencia a temperatura final da água, já que para tanques muito grandes a água não chegava à temperaturas altas como em tanques menores (BERGENE; LØVVIK, 1995; CHOW, 2010).

Chow, em seu estudo, citou testes realizados em Riyadh na Arábia Saudita em 1998, que mostraram que as altas temperaturas no verão podem levar a perdas de até 30% em eficiência elétrica em sistemas PVT, apesar da eficiência térmica ser boa. Neste mesmo estudo durante os meses de inverno, os módulos apresentaram boa performance elétrica, e em contrapartida, eficiências térmicas mais baixas (HARBI; EUGENIO; ZAHRANI, 1998; CHOW, 2010).

O aumento na pesquisa de sistemas PVT a partir dos anos 1990 aparentemente foi uma resposta à deterioração do meio ambiente e o crescente interesse na indústria da construção devido à possibilidade de integração de módulos fotovoltaicos em construções (sistemas também chamados de BiPV, abreviação de Building Integrated Photovoltaic). Sistemas PVT provém uniformidade na arquitetura de fachada do prédio e esteticamente são melhores que se fossem instalados dois diferentes tipos de sistema, sendo um para o fotovoltaico e um para o térmico. No final da década de 1990 casas solares com sistemas PVT/água foram projetadas no Japão, no entanto sua construção não foi efetivada devido à falta de demanda (CHOW, 2010).

Em seu artigo, Chow também citou o estudo de Zondag et. al., onde modelos de simulação de sistemas PVT/água foram desenvolvidos para análise de viabilidade técnica. Com isso, foi possível obter curvas de eficiência de nove diferentes configurações de coletores, os quais apresentaram eficiência térmica entre 52 e 65%. Neste estudo, a posição dos tubos, a configuração dos mesmos e os tipos de células solares utilizadas variaram, causando assim esta diferença em eficiência térmica. Além disso, os módulos de silício monocristalino apresentaram o melhor desempenho elétrico (ZONDAG et al., 2003; CHOW, 2010).

Já o estudo de Sandnes e Rekstad investigou o desempenho de um coletor com células solares de silício com uma camada adicional de um polímero cuja função era absorver calor. A análise feita, mostrou que a presença de células solares reduziu a absorção de calor em aproximadamente 10% da radiação solar, e que a camada de vidro temperado reduz a eficiência ótica em aproximadamente 5%. Ao realizar este estudo, concluiu-se que este tipo de aplicação pode ser eficaz em casos que água não necessita ser aquecida a altas temperaturas (SANDNES; REKSTAD, 2002; CHOW, 2010)).

No estudo de sistemas PVT, grande parte dos pesquisadores focaram na análise da configuração da tubulação de água, de modo a maximizar a transferência de calor da placa para o fluido. Dentre estes estudos, Chow introduziu um modelo dinâmico para analisar coletores térmicos com tubos de absorção de calor, e ressaltou a importância do contato térmico entre as células solares e o prato de absorção, assim como o contato entre o prato de absorção e a tubulação por onde a água passa (CHOW, 2003). Assim, quanto melhor o contato entre as camadas do sistema e quanto maior o comprimento do trocador de calor, melhor a transferência de calor por condução, e conseqüentemente, mais calor é transferido para o fluido.

Ao realizar a revisão bibliográfica, o estudo mais similar ao que será feito no trabalho em questão foi o de Ibrahim et. Al., onde a performance de coletores com sete diferentes configurações de tubulação foram estudadas e simuladas. O intuito da pesquisa foi encontrar a configuração dos canos em que a eficiência térmica seria máxima, e ao realizar o estudo, concluiu-se que quanto mais próximos os canos estiverem um do outro e da placa, melhor a transferência de calor, e conseqüentemente, melhor o desempenho térmico do sistema, conclusão similar à de Chow, acima citada. A melhor eficiência térmica obtida foi de 50,12% e a melhor eficiência elétrica foi de 11,98% para o fluxo em espiral (IBRAHIM et al., 2009). Para o fluxo oscilatório, que é a configuração a ser usada neste trabalho, a eficiência não chegou aos valores acima citados devido ao espaçamento entre os canos, o que reduz a transferência de calor.

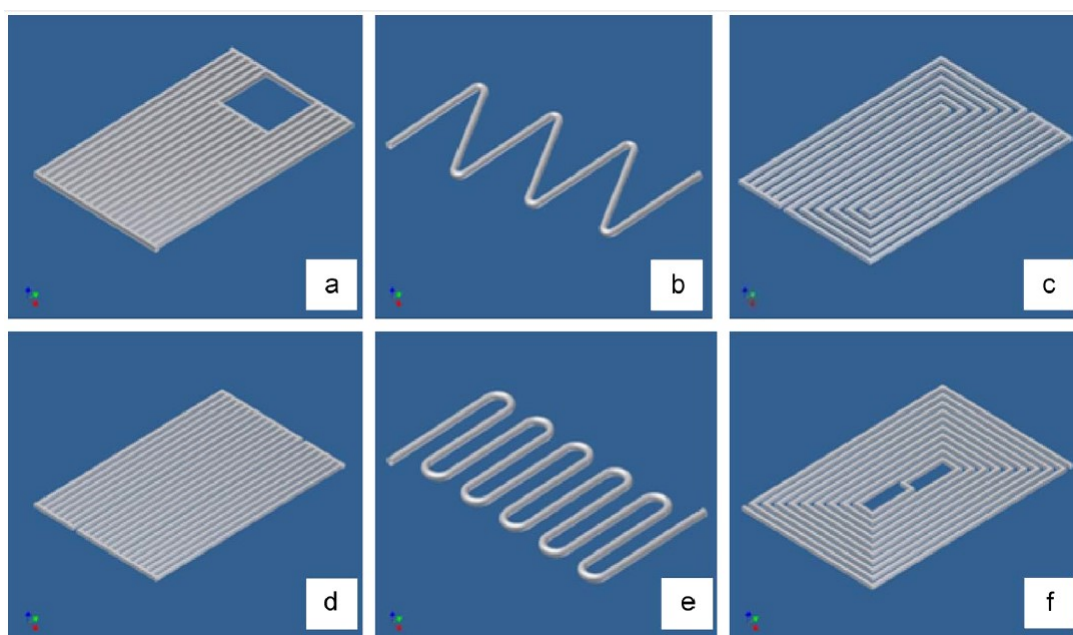


Figura 3 – Simulação de diferentes configurações de coletores.

(a) fluxo direto, (b) fluxo em serpentina, (c) fluxo em serpentina paralela, (d) fluxo modificado de serpentina paralela, (e) fluxo oscilatório, (f) fluxo em espiral. Fonte: adaptado de Ibrahim et al., 2009.

Aste et al. em 2014 analisaram sistemas PVT/água com células de silício amorfo e células de filme fino a fim de comparar a eficiência total com a eficiência de células fotovoltaicas sem os tubos. Como o estudo foi feito durante o inverno, a eficiência elétrica do painel fotovoltaico foi ligeiramente maior que a do sistema PVT. No entanto, em termos de eficiência total, o sistema PVT apresentou melhores resultados, devido ao fato de produzir energia térmica e energia elétrica. Além disso, foram feitas simulações dos sistemas criados na pesquisa, e os resultados obtidos experimentalmente e numericamente foram similares, e apresentaram apenas pequenas variações, devido à acurácia dos aparelhos de medição (ASTE; PERO; LEONFORTE, 2014).

Já Marques, em seu estudo, analisou a viabilidade de coletores híbridos PVT para aplicação em aquecimento de água e micro-geração de eletricidade. Neste estudo três diferentes tipos de coletores foram estudados, sendo o primeiro composto por painel e tubo sem cobertura, o segundo sendo o painel e o tubo com cobertura, e o terceiro apenas o tubo com células transparentes.

Os resultados do estudo de Marques mostraram que o coletor com o melhor desempenho térmico foi o de tubos com cobertura devido ao melhor isolamento do sistema, enquanto o melhor desempenho elétrico foi a placa com tubos sem cobertura. O coletor de células transparentes apresentou baixo desempenho tanto elétrico como térmico (MARQUES et al., 2012).

Ao analisar a literatura no assunto, conclui-se que a maior parte dos autores enfatizaram a importância do isolamento térmico e do contato entre a placa fotovoltaica e os tubos, sendo que quanto mais próximos eles tiverem um do outro melhor a transferência de calor, e conseqüentemente, melhor a eficiência térmica.

É esperado que o mercado fotovoltaico/térmico apresente crescimento nos próximos anos devido ao potencial de produção energética, assim como ao crescimento da preocupação com a preservação do meio ambiente. Por estes motivos é grande a importância de desenvolvimento de pesquisas na área, para que em um futuro breve tais tecnologias possam ser comercializadas e difundidas a preços acessíveis.

2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor é uma ciência que lida com a taxa de transferência de energia térmica (ÇENGEL; GHAJAR, 2009). Esta, possui ampla área de aplicações, que vai desde processos industriais a aparelhos domésticos comuns e a sistemas de produção de energia, como é o caso da transferência de calor que ocorre do meio para os módulos solares, que estão em pauta neste trabalho.

A primeira lei da termodinâmica também conhecida como princípio da conservação

de energia, segundo Çengel, (2009, p. 11) estabelece que “a energia não pode ser criada nem destruída durante um processo; pode apenas mudar de forma”. Isto mostra que a diferença líquida na energia total de um sistema durante um processo é equivalente à diferença entre a energia recebida e a energia rejeitada pelo sistema durante este processo.

No caso de um módulo fotovoltaico, a energia total disponível é a radiação solar por unidade de área. No entanto, parte desta é refletida pela superfície, parte é perdida por convecção e radiação para o meio, e apenas parte dela é conduzida pelo módulo e convertida em energia elétrica.

Quando se trata de um coletor solar, a energia disponível também é a radiação solar por unidade de área. Neste caso, o ganho de energia se dá pelo aumento de temperatura do fluido de trabalho em função do fluxo mássico e da sua capacidade de condução de calor. Perdas por condução, radiação e convecção também ocorrem.

Ao entender os fundamentos da transferência de calor entre dois corpos, é possível concluir que o calor pode ser transferido de mais de uma forma. Sendo assim é possível que energia seja transferida simultaneamente por condução, convecção e radiação.

3 METODOLOGIA

3.1 EQUAÇÕES

No Trabalho de Conclusão de Curso 1, as equações de transferência de calor do sistema foram determinadas com o intuito de serem aplicadas ao caso em estudo neste trabalho. Foi estabelecido que o calor útil disponível para o módulo Q_i , é equivalente à energia proveniente do Sol na área de superfície do painel, que é dada por (KALOGIROU, 2004):

$$Q_i = G_t A_s \quad (3.1)$$

Onde G_t é a radiação solar global incidente no coletor, dada em W/m^2 e A_s é a área de superfície do módulo, dada em m^2 .

A taxa de perda de calor depende do coeficiente global de perda de calor U_L , que foi estimado a partir das características físicas do modelo. Tal coeficiente é representado por (ARCURI; REDA; SIMONE, 2014):

$$U_L = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{L_{vidro}}{k_{vidro}} + \frac{L_{EVA}}{k_{EVA}} + \frac{L_{Si}}{k_{Si}} + \frac{L_{EVA}}{k_{EVA}} + \frac{L_{tedlar}}{k_{tedlar}} + \frac{L_{PET}}{k_{PET}} + \frac{L_{tedlar}}{k_{tedlar}} + \frac{2L_{Al}}{k_{Al}} + \frac{L_{Cu}}{k_{Cu}} + \frac{1}{h}} \quad (3.2)$$

Onde L é a espessura, dada em metros, k é a condutividade térmica do material e h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, estimado em função da velocidade do vento. Cada um dos valores da fórmula são equivalentes às respectivas camadas que compõem o módulo. O valor do coeficiente de perda de calor não é constante, pois ele depende da velocidade do vento no instante determinado. Sendo w a velocidade do vento, dada em m/s, o coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser calculado através da seguinte expressão (KALOGIROU, 2004):

$$h = 5,7 + 3,8w \left[\frac{W}{m^2 \cdot C} \right] \quad (3.3)$$

A Tab.(01) mostra os valores de espessura aproximada de cada uma das camadas de um módulo fotovoltaico, assim como os respectivos valores de condutividade térmica. A partir destes dados e do valor obtido com o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção, é possível calcular o valor do coeficiente de perdas U_L para determinado instante de tempo.

Sendo T_s a temperatura de superfície do módulo, e T_∞ a temperatura ambiente, a taxa de perda de calor do sistema Q_0 foi determinada por:

Material	Espessura [m]	Condutividade Térmica [$\frac{W}{mK}$]
Vidro Temperado	0,004	1,16
EVA	0,00018	0,25
Silício	0,00027	149
Tedlar	0,00011	0,2
PET	0,00015	0,2
Alumínio	0,002	110

Tabela 1 – Propriedades das camadas constituintes do módulo solar.

(ARCURI; REDA; SIMONE, 2014; ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

$$Q_0 = U_L A_s (T_s - T_\infty) \quad (3.4)$$

Devido à imprecisão na determinação do coeficiente de perda de calor U_L e do fator de remoção de calor do módulo, ficou estabelecido que, para o estudo em questão, o ganho de energia útil do trocador de calor será medido em termos da diferença entre a energia disponível Q_i e a taxa de perda de calor Q_0 , que representa a energia útil do sistema e que também pode ser medida em termos da quantidade de calor recebida pelo fluido:

$$Q_u = Q_i - Q_0 = \dot{m} c_p (T_f - T_i) \quad (3.5)$$

Onde T_f é a temperatura que a água sai do coletor e T_i é a temperatura de entrada da água no coletor.

Portanto, ao aplicar a equação acima é possível encontrar o calor disponível para aquecer a água em um sistema através do fluxo mássico da água, da diferença de temperatura e do calor específico da água.

A eficiência térmica η_t e elétrica η_e do coletor podem ser determinadas a partir das equações a seguir:

$$\eta_t = \frac{\dot{m} c_p (T_f - T_i)}{G_t A_s} \quad (3.6)$$

$$\eta_e = \frac{VI}{G_t A_s} \quad (3.7)$$

Onde \dot{m} e c_p são respectivamente o fluxo mássico de água e a capacidade de calor específica do fluido, A_s é a área de superfície do coletor, $(T_f - T_i)$ é a diferença entre a temperatura de entrada e saída do fluido que passa pelo coletor, G_t é a irradiação solar normal à superfície e V e I são respectivamente a tensão e corrente que passam pelo circuito no momento da medição (CHOW, 2010). Com estes dados, é possível calcular a eficiência total do coletor, que é dada pela soma das eficiências térmica e elétrica.

3.2 ESTUDO DE CASO: DUBLIN

O Trabalho de Conclusão de Curso I abordou o estudo de caso de um sistema híbrido existente na cidade de Dublin, na Irlanda. Os dados ali obtidos serão utilizados neste trabalho para comparar com os resultados medidos no protótipo criado e testado em Brasília.

O sistema instalado em Dublin é composto por um módulo fotovoltaico de silício monocristalino de 80W de potência e 0,648m² de área de superfície, com uma tubulação de cobre acoplada ao fundo do painel, e um revestimento de aço inoxidável para isolar os canos do ambiente. A tubulação que passa no fundo do painel é composta por quatro tubos paralelos uns aos outros, que ao saírem do módulo são direcionados a um tanque de armazenamento de 140 litros de capacidade, localizado acima do painel (BROWNE et al., 2015). A temperatura normal de operação da célula fotovoltaica é de aproximadamente 50°C, a corrente na máxima potência é de 4,58A e a tensão na máxima potência é de 17,5V, de acordo com o fabricante.

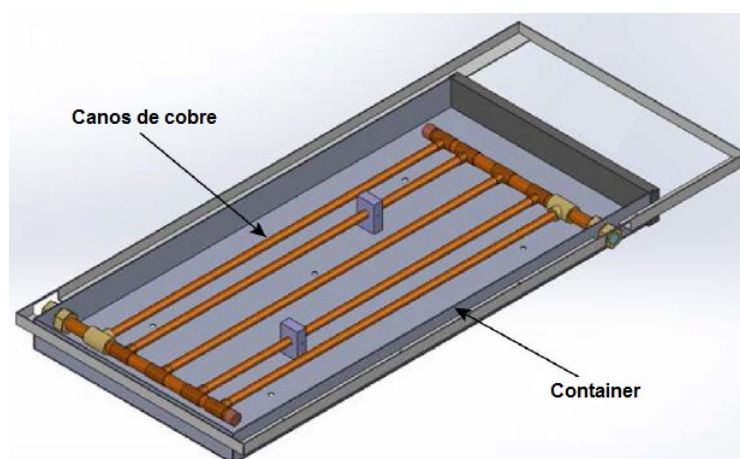


Figura 4 – Esquema do trocador de calor utilizado em Dublin.

Fonte: adaptado de (BROWNE et al., 2015).

Para o armazenamento de dados foram utilizados dois *dataloggers*, e para a obtenção das variáveis foram instalados termopares no módulo, no tanque de armazenamento e na entrada e saída de água do trocador de calor. Além disso, uma estação meteorológica que mede temperatura ambiente, índice pluviométrico, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa do ar também foi utilizada.

Sob essas condições, o sistema foi capaz de produzir energia elétrica, aquecer água e reduzir a temperatura do painel solar através da transferência de calor para a água. O sistema de armazenamento de dados em conjunto com os diversos termopares instalados no sistema permitiram a análise dos dados coletados, que serão comparados com os dados obtidos através da medição do modelo criado em Brasília.

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.3.1 Montagem do Sistema

Um modelo com características semelhantes ao protótipo existente em Dublin foi criado e instalado na Universidade de Brasília, campus Gama. As coordenadas geográficas do local são 15,989023° Sul e 48,045076° Oeste, e ali foram coletados os dados de temperatura de entrada e saída da água, temperatura da água armazenada, temperatura da superfície do painel, tensão, corrente e vazão mássica.

Para a criação do modelo, foi utilizada uma placa fotovoltaica Yingli solar modelo YL20P-17b de silício policristalino com 36 células. As especificações do módulo estão na tabela a seguir:

Máxima Potência	20 Watts
Tensão de máxima potência	17,3 Volts
Corrente de máxima potência	1,16 Ampère
Tensão de circuito aberto	21,3 Volts
Corrente de curto-circuito	1,32 Ampère
Tensão máxima do sistema	50 Volts
Eficiência do painel	10,90%
Coefficiente de temperatura da potência	-0,45%/°C
Coefficiente de temperatura da corrente	0,06A/°C
Coefficiente de temperatura da tensão	-0,37V/°C
Temperatura nominal de operação da célula (NOCT)	46°C
Área de superfície	0,18375 ²

Tabela 2 – Especificações painel solar Yingli STP-020-17b.

Uma folha de papel alumínio com aproximadamente 0,18m² de área foi colocada no fundo do painel, e utilizada com o intuito de aumentar a transferência de calor do módulo para a água.

O trocador de calor foi feito de acordo com as dimensões da placa fotovoltaica, a partir de um cano de cobre com 3,5 metros de comprimento e 15 milímetros de diâmetro. O objetivo era fazer uma espécie de serpentina, de modo a maximizar a área de contato entre o cano e o painel, para tornar mais eficiente a transferência de calor.

Para isso, o cano foi cortado em onze partes, que foram conectadas às outras através de conexões de cobre com curva de 180°. O espaçamento entre os canos foi de aproximadamente 2 centímetros.

Para evitar vazamentos, os canos foram soldados. Após a soldagem, o trocador de calor foi encaixado dentro da moldura de alumínio da parte traseira do painel, como mostra a Fig.(5).



Figura 5 – Foto do fundo do painel, com o trocador de calor instalado.

Para verificar se a energia produzida pelo painel estava sendo consumida, e também para permitir a obtenção dos dados de potência, um circuito elétrico foi criado. Nele, o painel solar foi a fonte de energia e uma lâmpada de corrente contínua de 24V e 70W de potência foi ligada em série com a fonte e utilizada como a carga do sistema. Para a obtenção da tensão do circuito, um multímetro digital Multitoc modelo DT830B foi utilizado na função de voltímetro e ligado em paralelo com a lâmpada e para a obtenção da corrente elétrica, outro multímetro digital Multitoc modelo DT830B foi utilizado na função de amperímetro, e ligado em série com a fonte e a lâmpada. A conexão dos componentes do circuito foi feita através de cabos de cobre.

Para evitar a perda de temperatura do trocador de calor para o meio, uma camada de fibra de vidro foi colocada como uma tampa de isolamento do coletor, permitindo assim a retenção de maior quantidade de energia disponível para a água.

Para fazer o transporte da água até a entrada do trocador de calor, uma mangueira foi utilizada com uma extremidade ligada na torneira de água, e outra extremidade ligada no cano de entrada do sistema.

Após passar pela tubulação, a água sai do sistema e é depositada em um recipiente plástico com 10 litros de capacidade. Tal recipiente foi colocado em cima de uma balança digital modelo SF-400 Alta Precisão Eletrônica, que mede a massa de água que entra no recipiente. Assim, foi possível determinar a vazão mássica da água, pois era possível filmar o visor da balança, e conseqüentemente determinar a massa de água que era depositada por unidade de tempo.

Por fim, um termômetro digital com erro de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ foi utilizado para medir as temperaturas de superfície do módulo e temperaturas de entrada e saída da água.

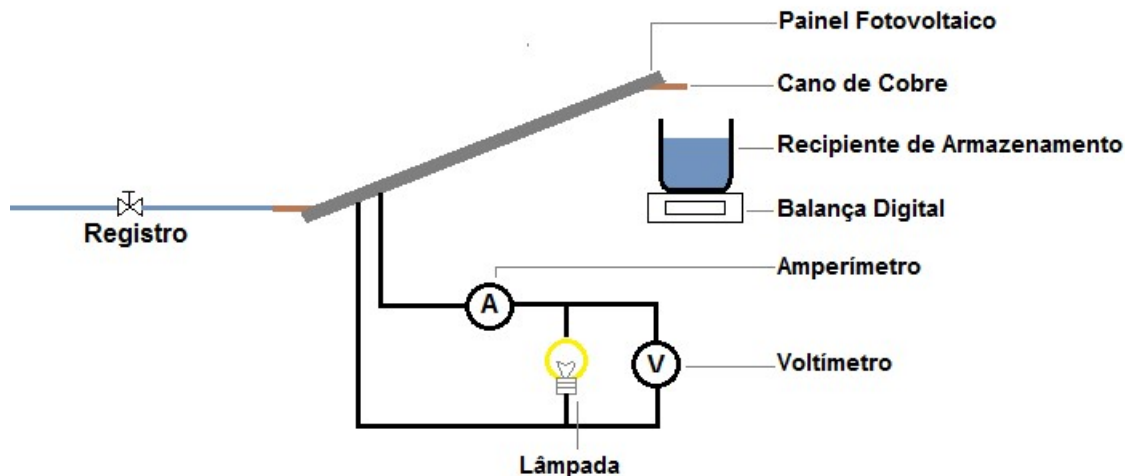


Figura 6 – Esquema do sistema criado.

3.3.2 Coleta de Dados

Os dados de radiação solar e temperatura ambiente utilizados para a pesquisa foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na estação automática A-046 (Gama Ponte Alta). As coordenadas da estação são 15,935139° Sul e 48,137377° Oeste. Devido à proximidade entre a estação e o local de instalação do modelo, os dados de radiação solar do INMET foram utilizados neste trabalho para o cálculo da eficiência (INMET, 2016).

Para entender melhor o efeito do trocador de calor no sistema híbrido, três medições foram feitas em dias distintos.

A primeira foi realizada no dia 15 de outubro de 2016 entre 09:00h e 17:00h. Tal medição foi realizada com o intuito de entender o funcionamento apenas do sistema fotovoltaico, isto é, o sistema térmico não estava instalado e não foi utilizado. Os dados de tensão, corrente e temperatura de superfície da placa foram medidos e registrados a cada 30 minutos com o auxílio dos instrumentos de medição. Os procedimentos para a obtenção das variáveis foram:

1. O painel solar foi posicionado em local aberto, sem sombra, orientado para o norte e inclinado a 16 graus;
2. O circuito elétrico foi montado de acordo com o esquema mostrado na Fig. (6), para a obtenção instantânea dos dados de tensão e corrente;
3. O termômetro foi ligado e colocado na superfície da placa, para a obtenção da temperatura do painel;

4. Os dados mostrados no visor dos multímetros e do termômetro foram registrados em planilha do Microsoft Excel. O intervalo entre as coletas de dados foi de 30 minutos.

A segunda medição foi realizada no dia 25 de outubro de 2016 entre 09:00h e 16:00h. Por fim, a terceira medição foi realizada no dia 05 de novembro de 2016, entre 09:00h e 17:00h. Para as duas últimas coletas de dados as mesmas variáveis foram medidas. Nestas o trocador de calor foi instalado, o que permitiu a análise do desempenho elétrico e térmico do sistema. Os seguintes procedimentos foram seguidos:

1. O painel solar foi posicionado em local aberto, sem sombra, orientado para o norte, inclinado a 16 graus e colocado em uma superfície de apoio;
2. O circuito elétrico foi montado de acordo com o esquema mostrado na Fig. (6), para a obtenção instantânea dos dados de tensão e corrente;
3. A mangueira foi ligada com uma das extremidades acoplada à uma torneira, onde a vazão era regulada, e outra extremidade conectada ao cano de entrada do trocador de calor;
4. A balança foi posicionada abaixo do cano de saída do trocador de calor, e o recipiente para coleta de água foi colocado na balança;
5. A torneira foi ligada, e sua vazão controlada;
6. Com o auxílio de uma câmera, o visor da balança foi filmado, de modo a permitir o cálculo da vazão mássica da água;
7. Com o auxílio do termômetro, os dados de temperatura de entrada e saída da água, assim como a temperatura de superfície do painel foram medidos;
8. As medições foram feitas a cada 30 minutos, e os dados coletados foram registrados em planilha do Microsoft Excel.

A medição de tais variáveis permite a análise do comportamento do sistema, assim como permite a determinação da eficiência total do mesmo. Os resultados serão mostrados no capítulo a seguir.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DADOS COLETADOS

Para a análise dos dados coletados, é importante levar alguns fatores em consideração:

- As medições foram feitas com intervalo de tempo de 30 minutos, o que pode ser considerado relativamente longo, levando em conta que as condições climáticas podem alterar em pequenos intervalos de tempo. Assim, os dados registrados são referentes ao momento específico em que a medição foi feita, o que nem sempre retrata a característica do clima durante todo o intervalo de tempo entre as medições.
- O termômetro utilizado para a obtenção das temperaturas não possui aferição de casa decimal. Sendo assim, os dados de temperatura de entrada e saída da água tornam-se menos precisos, se levarmos em consideração que por vezes a água pode ter aumentado apenas alguns décimos de °C, valor que não pode ser medido pelo termômetro. Como consequência, os valores obtidos para a eficiência térmica do sistema possuem margem de erro, devido à imprecisão na determinação dos valores da diferença de temperatura da água.
- A coleta de dados para o painel fotovoltaico e para o sistema PVT foram feitas em dias separados, como já mencionado. Neste caso, o ideal seria que as medições para ambos os sistemas fossem feitas no mesmo dia, sob as mesmas condições climáticas, assim como foi feito em Dublin. Como isso não foi possível, os dados dos dias com condições climáticas mais parecidas serão analisados. Além disso, para maior acurácia dos dados, seria desejável um sistema de coleta e armazenamento de dados automatizado.

As figuras (7) e (8) mostram, respectivamente, os valores de radiação solar e a temperatura ambiente para os três dias de medição. Dos três dias, 15 de outubro foi a data que apresentou maior média de temperatura ambiente e radiação solar. Neste dia o céu estava claro até aproximadamente 14:30h, quando nuvens apareceram, o que resultou em redução da radiação solar e, conseqüentemente, em queda da potência elétrica produzida.

No dia 25/10, o céu estava claro durante o período da manhã. No período entre 12:00h e 13:00h o céu permaneceu nublado, o que justifica a queda brusca dos valores de radiação solar.

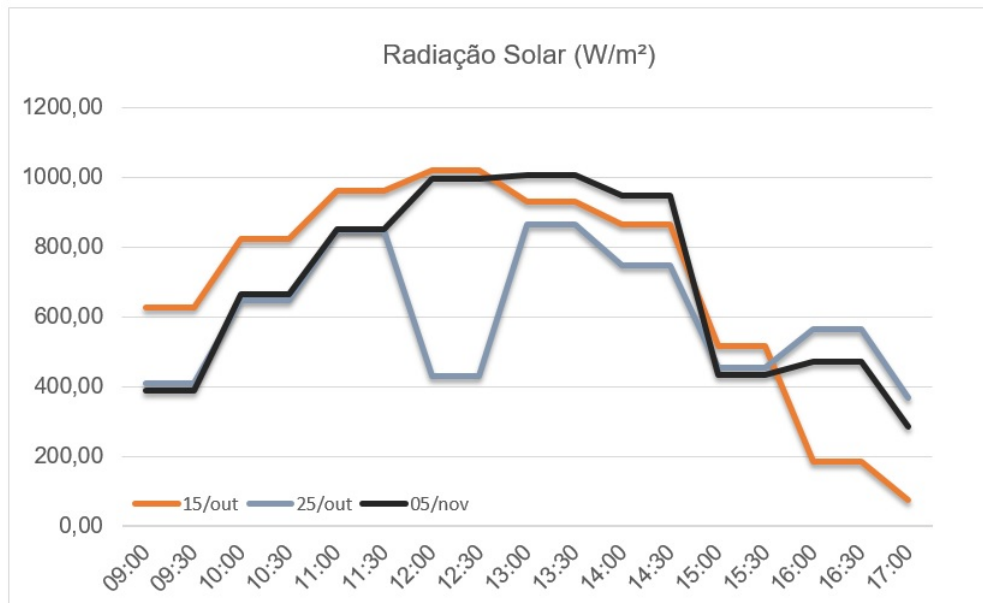


Figura 7 – Radiação solar para os três dias de realização do experimento.

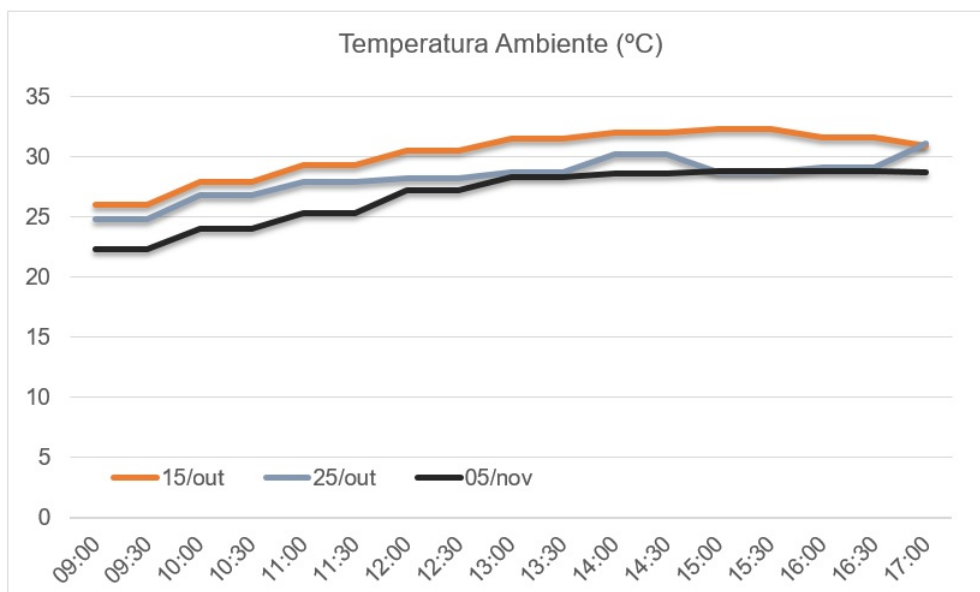


Figura 8 – Temperatura ambiente para os três dias de realização do experimento.

Por fim, no dia 05 de novembro o céu estava claro no começo da manhã, e ficou nublado a partir das 14:30h. Como o céu permaneceu com nuvens em grande parte do tempo, o Sol não aqueceu o módulo a altas temperaturas. Além disso, este foi o único dia em que a temperatura ambiente não ultrapassou os 30°C e foi o dia com maiores valores registrados de velocidade do vento, que chegou a mais de 9m/s (INMET, 2016). Durante o período da manhã, a temperatura ambiente era de 22,4°C e aumentou gradativamente até as 13:00h, chegando a 28,4°C, valor que se manteve constante durante todo o período da tarde.

A oscilação nos valores de radiação solar e temperatura ambiente em conjunto com outros fatores como nebulosidade do céu e velocidade do vento influenciam diretamente na quantidade de energia produzida pelo módulo. Para retratar a situação, a Fig.(9) mostra a variação dos valores de potência elétrica obtidos para os três dias.

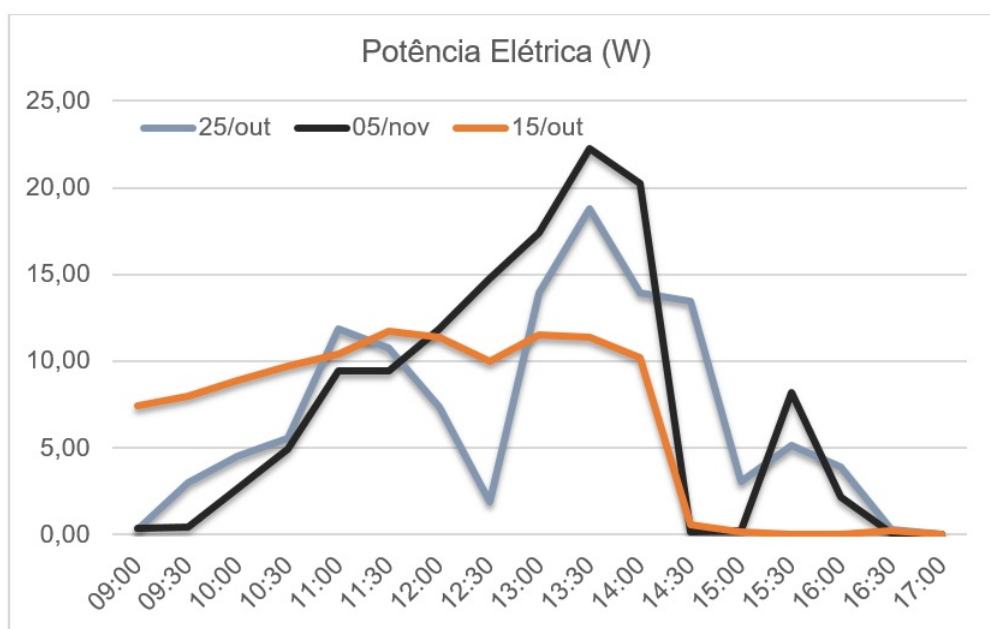


Figura 9 – Potência elétrica produzida nos três dias de medição.

Com o intuito de entender melhor a relação entre radiação, temperatura ambiente e potência elétrica, a Tab.(03) faz um comparativo destes dados para os três dias.

Data	15/10	25/10	05/11
Radiação Solar média (W/m^2)	701	605	695
Temperatura Ambiente média ($^{\circ}C$)	30,19	28,22	26,8
Potência Máxima (W)	11,74	18,8	22,23
Potência Média (W)	6,58	6,93	7,34

Tabela 3 – Comparativo das potências, radiação e temperatura ambiente nos três dias de medição.

Os dados mostram que as medições feitas com o sistema PVT apresentaram valores de potência máxima consideravelmente mais altos que a do sistema PV. Em contrapartida, a temperatura ambiente do dia em que as medições do sistema PV foram feitas foi mais alta que nos demais dias, o que pode justificar parte da redução na potência elétrica.

Como as curvas de radiação solar dos dias 15 de outubro e 05 de novembro foram semelhantes, os dados obtidos nestes dias serão comparados a seguir, para caracterizar o comportamento do sistema térmico.

As figuras (10) e (11) retratam a variação da eficiência obtida e da potência ao longo do dia, para o módulo fotovoltaico (15/10) e para o sistema PVT (05/11), respectivamente.

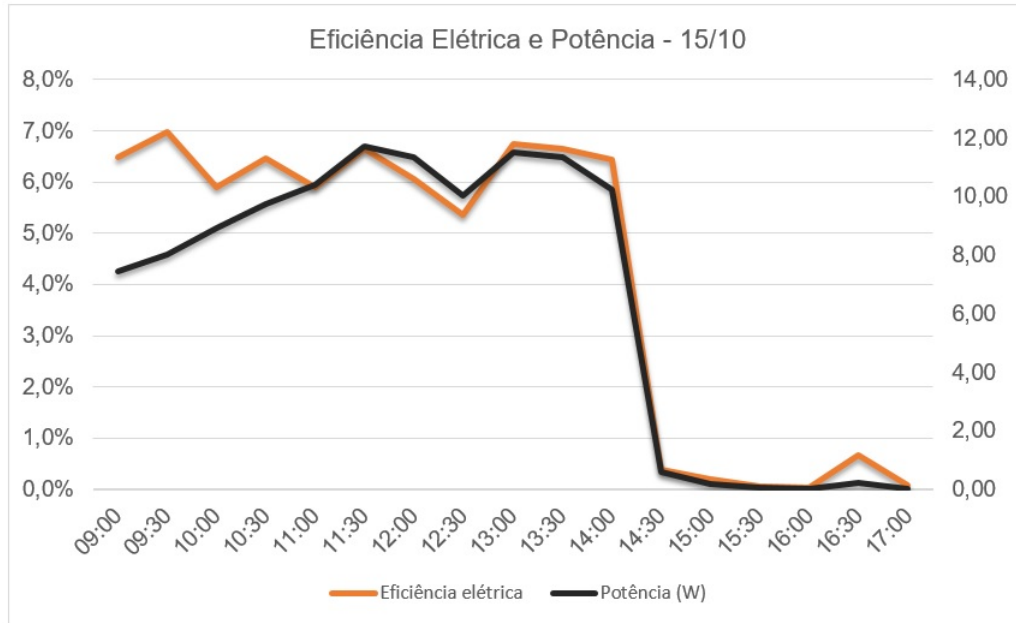


Figura 10 – Potência elétrica e potência para o sistema PV - 15/10.

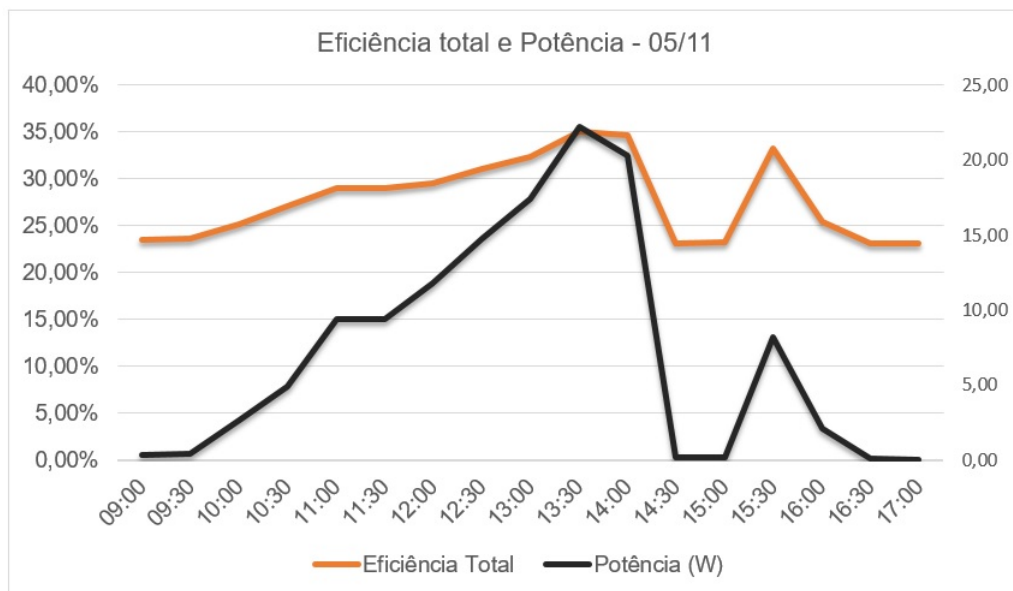


Figura 11 – Potência elétrica e potência para o sistema PV - 05/11.

Para o dia 15/10, é possível observar que a curva de eficiência e de potência produzida seguiram quase os mesmos parâmetros, apresentando variação apenas durante a manhã, quando a eficiência elétrica atingiu valores mais altos devido à baixa radiação solar incidente. Vale ressaltar que a eficiência elétrica não ultrapassou o valor de 7%, e a potência elétrica não ultrapassou os 12W, valores abaixo da potência nominal do módulo.

Para o dia 05/11, a eficiência total foi dada pela soma da eficiência elétrica no momento da medição, com a eficiência térmica média obtida para o dia, que foi de 23%. Neste dia, a eficiência elétrica chegou a 12%, que somado à eficiência térmica resultou em um valor total de 35% da energia do Sol aproveitada.

Na Fig. (12), foram selecionados os 10 pontos de maior eficiência elétrica obtidas nos dias 15/10 e 05/11, representando o módulo fotovoltaico e o sistema híbrido, respectivamente.

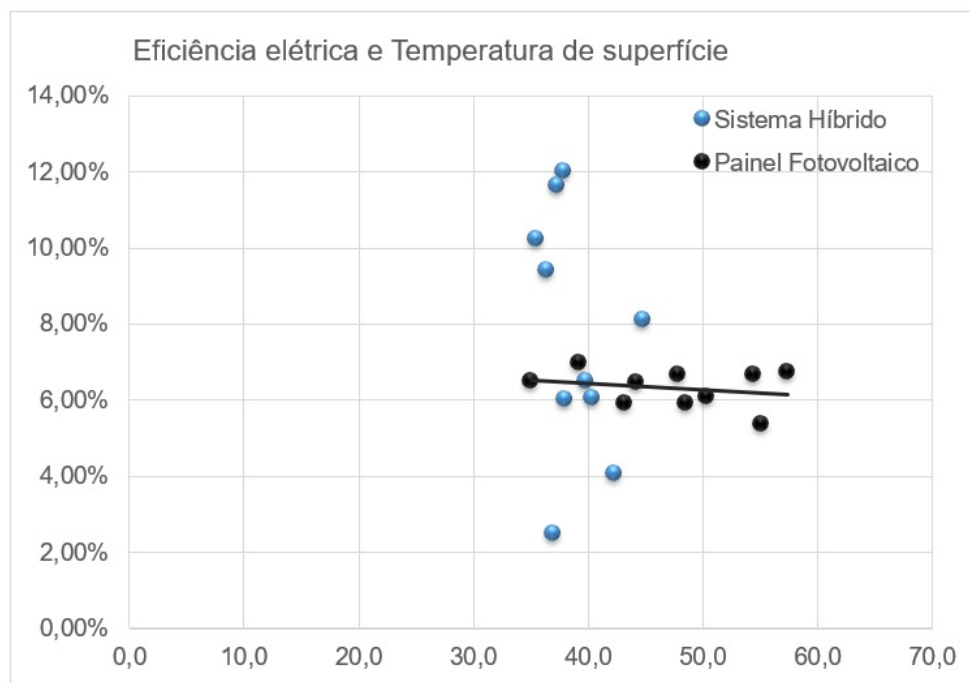


Figura 12 – Relação entre eficiência elétrica e temperatura de superfície.

É possível observar que a eficiência elétrica é mais baixa para o módulo fotovoltaico, e que as temperaturas de superfície ultrapassaram os 50°C, enquanto as temperaturas de superfície do sistema híbrido permaneceram entre 35 e 45°C.

Parte disso ocorreu devido à temperatura ambiente do dia 15/10, que durante as horas de medição foi de aproximadamente 30,2°C, contra os 26,8°C do dia 05/11, e também porque no último dia o céu estava mais nublado, e isso impediu que o painel atingisse altas temperaturas.

No entanto, o considerável aumento da eficiência elétrica do sistema híbrido deve-se também à água que retira parte do calor do módulo, o que permite melhor operação das células solares. Sendo assim, é possível concluir que o sistema híbrido de fato remove calor da superfície do módulo e ajuda a elevar o rendimento elétrico do sistema.

A Tab.(04) resume os principais parâmetros analisados pelo painel fotovoltaico e pelo sistema híbrido.

Variável	Painel Solar	Sistema Híbrido
Radiação Solar média [W/m ²]	701	695
Temperatura Ambiente média [°C]	30,19	26,8
Potência Elétrica Máxima [W]	11,74	22,23
Potência Elétrica Média [W]	6,58	7,34
Potência Térmica Média [W]	-	25,12
Temperatura Máxima do Painel [°C]	57	45
Temperatura Média do Painel [°C]	43	36
Diferença Média de Temperatura da Água [°C]	-	0,53
Eficiência Elétrica Média [%]	4,2	5,02
Eficiência Elétrica Máxima [%]	7,01	12,01
Eficiência Térmica Média [%]	0	23
Eficiência Térmica Máxima [%]	0	58
Eficiência Total [%]	4,2	28,02

Tabela 4 – Comparação dos dados obtidos com o painel solar e sistema híbrido, para Brasília.

Ao efetuar os cálculos de eficiência total, obteve-se o valor de 28% para o sistema PVT, contra apenas 4,2% do painel solar. A revisão bibliográfica sobre o tema aponta para sistemas semelhantes que atingiram eficiência térmica de aproximadamente 50%, contra apenas 23% obtidos neste estudo.

A baixa eficiência total pode ser justificada pela escala em que o modelo foi desenvolvido, assim como pela metodologia de obtenção dos dados que foi realizada sem um sistema automatizado. Apesar de não ter sido testada, uma opção seria criar um tanque de armazenamento com um sistema de bombeamento da água, para permitir a circulação contínua do fluido. No entanto, tal opção exigiria o uso de energia elétrica para a operação da bomba, e por isso não foi estudada no sistema em questão, já que o objetivo deste é apenas de analisar se a água é aquecida e se a eficiência elétrica do sistema é beneficiada com o uso do sistema híbrido.

Como as medições foram feitas a cada 30 minutos, foi possível observar que a água armazenada nos canos de cobre durante o tempo entre as medições atingiu valores de até 42°C. No entanto, à medida em que a água passava pelo sistema, a temperatura da mesma reduzia até chegar em um momento em que a temperatura de entrada e saída da água fosse a mesma. Neste ponto, o painel já estava resfriado, o que permitia melhores condições de operação para o mesmo.

4.2 COMPARAÇÃO: BRASÍLIA E DUBLIN

4.2.1 Resultados obtidos em Dublin

A Tab.(05) apresenta os dados obtidos no sistema de Dublin no dia 07 de junho de 2015, das 09:00 às 17:00. Como o módulo fotovoltaico utilizado neste caso é de silício monocristalino de 80W de potência e eficiência de 15%, os dados de potência e rendimento elétrico não podem ser diretamente comparados aos dados de Brasília, já que a eficiência do módulo utilizado neste estudo é de 10,8% e a potência de 20W.

Variável	Painel Solar	Sistema Híbrido
Radiação Solar média [W/m ²]	522	522
Temperatura Ambiente média[°C]	16,63	16,63
Potência Elétrica Máxima [W]	71,86	80,19
Potência Elétrica Média [W]	32,49	34,53
Potência Térmica Média [W]	-	72,74
Temperatura Máxima do Painel [°C]	35,8	34,06
Temperatura Média do Painel [°C]	24,55	23,76
Diferença Média de Temperatura da Água [°C]	-	1,74
Eficiência Elétrica Média [%]	13,5	14,2
Eficiência Térmica Média [%]	0	29,7
Eficiência Térmica Máxima [%]	0	86
Eficiência Total [%]	13,5	43,8

Tabela 5 – Comparação dos dados obtidos com o painel solar e sistema híbrido, para Dublin.

A partir dos dados da Tab.(05) é possível perceber que o módulo opera bem a baixas temperaturas de superfície, e que o sistema híbrido teve eficiência ligeiramente melhor que o sistema composto apenas pelo painel solar.

Em relação à eficiência térmica, o valor médio de 29,7% foi obtido. Além disso, o aumento de temperatura da água em Dublin foi de 1,74 °C, contra a média de apenas 0,5°C de Brasília, diferença que não se torna tão grande se considerarmos que a área do módulo de Dublin é três vezes maior.

Vale ressaltar que o trocador de calor de Dublin estava ligado a um tanque de armazenamento de água, que funcionava como um termosifão, levando a água aquecida para o tanque, e fazendo a água fria circular pelo módulo. Se este dispositivo for instalado no modelo de Brasília, é provável que a eficiência térmica aumente.

4.2.2 Comparação

A Fig. (13) faz uma comparação da radiação solar incidente em Dublin, de acordo com os valores obtidos pelo piranômetro instalado no local de realização do experimento, com os dados de radiação solar incidente em Brasília, de acordo com os dados fornecidos pelo CRESESB.

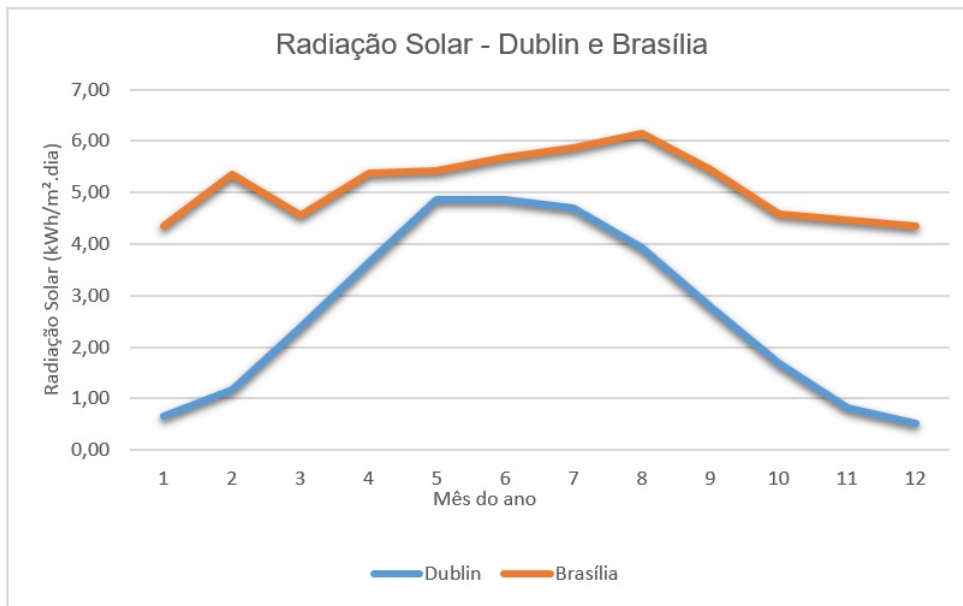


Figura 13 – Radiação solar em Brasília e Dublin ao longo do ano.

Fonte de dados: (CRESESB, 2015; MET ÉIREANN, 2016)

A figura mostra que em todos os meses do ano a radiação solar em Brasília é maior do que em Dublin, assim como é possível notar que a curva de radiação solar de Brasília varia menos que a curva de Dublin ao longo do ano. Estes dados, em conjunto com os resultados apresentados na Tab. (06) comprovam que a produção de energia para um sistema híbrido PVT em Brasília é mais eficiente e melhor distribuída ao longo do ano.

Local	Brasília	Dublin
Radiação Solar média (W/m ²)	695	552
Temperatura Ambiente média (°C)	26,8	16,6
Potência Média (W)	7,3	34,5
Temperatura Média do Pannel (°C)	36,0	23,6
Eficiência Elétrica Média (%)	5,0	14,2
Eficiência Térmica Média (%)	23	29,7
Eficiência Total (%)	28,02	43,80

Tabela 6 – Comparação de alguns dos dados obtidos em Brasília e Dublin.

A significativa diferença entre os valores de eficiência total em parte, deve-se às características elétricas do módulo fotovoltaico utilizado em Brasília, que possui eficiência

de 10,8%, contra os 15% do módulo utilizado em Dublin. Contudo, os dados de radiação solar média e temperatura ambiente mostram que o potencial de produção de energia para Brasília é melhor.

Por fim, apesar dos resultados de eficiência térmica do modelo criado em Brasília terem sido consideravelmente inferiores aos da literatura e ligeiramente inferiores aos dados obtidos em Dublin, acredita-se que se o sistema for melhorado de modo a aumentar a transferência de calor para a água, a eficiência térmica provavelmente será melhor, já que o potencial tanto de geração de energia elétrica como de geração de calor para aquecer a água é maior em Brasília devido às condições climáticas do local.

5 CONCLUSÃO

A realização das medições de algumas variáveis do sistema permitiu a caracterização de seu comportamento.

A eficiência elétrica do módulo de fato é reduzida com o aumento da temperatura de superfície. Para os dados coletados com o sistema híbrido, o calor foi transferido da superfície do painel para a água, e como consequência, um aumento na eficiência elétrica foi observado, quando comparado ao painel solar sem o sistema híbrido.

Para o modelo criado e analisado, a água foi aquecida em média $0,5^{\circ}\text{C}$, o que é pouco se considerarmos que a água para uso em residências é aquecida até aproximadamente 40°C . No entanto, o baixo aumento de temperatura da água pode ser justificado pela área de superfície do módulo, que era apenas de $0,18\text{m}^2$. Para o sistema de Dublin, a água aqueceu em média $1,74^{\circ}\text{C}$, resultado melhor que o obtido em Brasília, apesar da área de superfície do módulo utilizado ser maior. Assim, é possível concluir que o ganho de temperatura da água está diretamente relacionado à área de superfície do coletor.

A eficiência térmica do modelo de Brasília foi menor que a do modelo de Dublin. No entanto, acredita-se que tal diferença se deu devido às diferenças de projeto, o que substancialmente inclui a escala em que o modelo de Dublin foi construído.

O clima de Brasília é mais favorável para a instalação de sistemas híbridos PVT, sendo a temporada de seca, que ocorre entre os meses de abril e outubro, a melhor para produção de energia, tanto térmica como elétrica.

O caráter experimental de criação do modelo, a dimensão na escala do projeto e a metodologia de coleta de dados não automatizada pode ter afetado os resultados, principalmente em relação à eficiência térmica do sistema híbrido. No entanto, apesar de tais dificuldades, o comportamento do sistema foi bem caracterizado.

Foi possível observar que fatores como a velocidade do vento, radiação solar, temperatura ambiente e nebulosidade afetaram diretamente os resultados obtidos. Condições climáticas de chuva, vento e céu nublado fazem com que a eficiência do sistema reduza significativamente.

Seria necessário, também, que os módulos fotovoltaicos fossem conectados à rede ou que um banco de baterias fosse instalado para suprir a demanda energética da residência durante os horários em que não há radiação solar.

Por estes fatos, é possível concluir que devido ao baixo ganho de temperatura do fluido, o sistema híbrido seria ideal apenas para aplicações onde a água não necessita chegar a altas temperaturas, ou para pré-aquecimento de água em residências.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. *Banco de Informações de Geração - BIG*. Brasília, Brasil, 2016. Citado na página 1.
- ARCURI, N.; REDA, F.; SIMONE, M. Energy and thermo-fluid dynamics evaluations of photovoltaic panels cooled by water and air. In: *Solar Energy*. [S.l.: s.n.], 2014. v. 105, p. 147–156. Citado 3 vezes nas páginas 7, 13 e 14.
- ASTE, N.; PERO, C. del; LEONFORTE, F. Water flat plate pv-thermal collectors: a review. *Solar Energy*, Elsevier, v. 102, p. 98–115, 2014. Citado na página 10.
- BERGENE, T.; LØVVIK, O. M. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar energy*, Elsevier, v. 55, n. 6, p. 453–462, 1995. Citado na página 8.
- BHARGAVA, A. K.; GARG, H.; AGARWAL, R. K. Study of a hybrid solar system—solar air heater combined with solar cells. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 31, n. 5, p. 471–479, 1991. Citado na página 8.
- BROWNE, M. C. et al. Preliminary results of a photovoltaic/phase change material thermal system. *Eu PVsec*, p. 520–525, 2015. Citado na página 15.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. *Transferência de Calor e Massa*. [S.l.]: AMGH Editora, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 14.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. *Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica*. Rio de Janeiro, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. *Potencial Solar: Sun Data*. Rio de Janeiro, 2015. Citado na página 28.
- CHOW, T. Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, Elsevier, v. 75, n. 2, p. 143–152, 2003. Citado na página 9.
- CHOW, T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. In: *Applied Energy*. [S.l.]: Elsevier, 2010. v. 87, n. 2, p. 365–379. Citado 3 vezes nas páginas 7, 8 e 14.
- ELETOBRÁS. *Energia Solar para Aquecimento de Água no Brasil: Contribuição da Eletrobras Procel e Parceiros*. Rio de Janeiro, 2012. Citado na página 2.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. *Balço Energético Nacional 2016.: Ano base:2015 - relatório final*. Rio de Janeiro, Brasil, 2016. Citado na página 1.
- EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION. *Global market outlook for solar power: 2015-2019*. Bruxelas, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- HARBI, Y. A.; EUGENIO, N.; ZHRANI, S. A. Photovoltaic-thermal solar energy experiment in saudi arabia. *Renewable energy*, Elsevier, v. 15, n. 1, p. 483–486, 1998. Citado na página 8.

IBRAHIM, A. et al. Performance of photovoltaic thermal collector (pvt) with different absorbers design. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, v. 5, n. 3, p. 321–330, 2009. Citado na página 9.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. *Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática*. Brasília, Brasil, 2016. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTA0Ng==>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 22.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*: Ministério da ciência e tecnologia - mct. São José dos Campos, 2006. Citado na página 1.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. In: *Progress in Energy And Combustion Science*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 30, n. 3, p. 231–295. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 13.

LISBOA, D. S. Dimensionamento de um sfvcr: Estudo de caso do prédio central do campus universitário de tucuruí - pa: Trabalho de conclusão de curso em engenharia elétrica. In: . [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 7.

MARQUES, R. L. M. d. R. et al. Avaliação da viabilidade de colectores híbridos fotovoltaicos e térmicos para aplicação ao aquecimento de águas e micro-geração de electricidade. 2012. Citado na página 10.

MET ÉIREANN. *Monthly Data for Dublin*. Dublin, Irlanda, 2016. Disponível em: <http://www.met.climate.ie/climate/monthly-data.asp?Num=532>>. Citado na página 28.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. *Sistemas híbridos: soluções energéticas para a Amazônia*. Brasília, Brasil, 2008. 390 p. Citado na página 6.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *Sun Fact Sheet*. USA, 2016. Citado na página 5.

OBSERVATÓRIO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS PARA AMÉRICA LATINA E CARIBE. *Energia Solar Fotovoltaica*: Programa de capacitação em energias renováveis. [S.l.], 2013. 390 p. Citado na página 6.

SANDNES, B.; REKSTAD, J. A photovoltaic/thermal (pv/t) collector with a polymer absorber plate. experimental study and analytical model. *Solar Energy*, Elsevier, v. 72, n. 1, p. 63–73, 2002. Citado na página 8.

ZONDAG, H. et al. The yield of different combined pv-thermal collector designs. *Solar energy*, Elsevier, v. 74, n. 3, p. 253–269, 2003. Citado na página 8.