
**Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Energia Nuclear**



Curso de Graduação: Engenharia de Energia	Disciplina: EN248 Projeto de Graduação (TCC) Responsável pela Disciplina: Prof. Alexandre Costa Período: 2022.1 Local e Data: Recife, 09 de Novembro 2022
--	--

Trabalho de conclusão de curso

Comparações energéticas e econômicas entre coletores solares PVT, plano e módulos fotovoltaicos

Aluno: Gabriel Candido Guimarães e Silva Neto ; Matrícula: 128.121.754-94

Orientador: André Felipe Vieira da Cunha, Centro de Energias Renováveis

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva Neto, Gabriel Candido Guimarães e.

Comparações energéticas e econômicas entre coletores solares PVT, plano e
módulos fotovoltaicos / Gabriel Candido Guimarães e Silva Neto. - Recife, 2022.
43 p. : il., tab.

Orientador(a): André Felipe Vieira da Cunha

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Energia -
Bacharelado, 2022.

1. Coletor PVT. 2. Coletor Térmico. 3. Módulo Fotovoltaico. 4. Comparações
Energéticas. 5. Comparações Econômicas. I. Cunha, André Felipe Vieira da.
(Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Índice

Resumo	2
Introdução	7
Objetivos	7
Objetivos Gerais	8
Objetivos específicos	8
Pesquisa Bibliográfica	9
Energia solar térmica	9
Energia solar fotovoltaica	12
Coletores Solares Híbridos	15
Módulo PVT bi fluido	17
Módulo ar	17
Módulo água	18
Revisão Histórica e Proposição do Problema	19
Metodologia	22
Parâmetros Adotados	23
Coleta de dados e preços	24
Sistemas Convencionais	26
Sistema Híbrido PVT	27
Cálculos e Comparações Econômicas	29
Período de Recuperação do Investimento (Retorno)	30
Resultados	31
Conclusões e Perspectivas	36
Referências bibliográficas	39

RESUMO

A cada ano, as tecnologias relacionadas ao aproveitamento da energia solar ganham mais espaço em todos os âmbitos de nossa sociedade, seja no mercado de energia, nas pesquisas especializadas e até no meio midiático. Isso porque, por conta dos avanços tecnológicos, a humanidade está conseguindo adquirir, aos poucos, mais e mais eficiência no aproveitamento dessa energia solar, como também, na redução dos custos de fabricação dos equipamentos em questão. Esses equipamentos, que, atualmente, encontramos de diversos tipos, tamanhos e formatos diferentes, podendo realizar a conversão da energia solar em térmica, elétrica ou até uma junção dessas, gerando, assim, energia simultaneamente. Dessa forma, os coletores híbridos térmicos fotovoltaicos (PVT) vêm ganhando ainda mais destaques nessa área, já que a agregação da tecnologia de um coletor solar e de um módulo fotovoltaico faz com que eles tenham um grande potencial em muitas aplicações. Nesse contexto, nota-se que é importante realizar comparações dessas novas tecnologias com as convencionais nas quais já são conhecidas e consolidadas no mercado de energia. Assim, o objetivo principal dessa monografia é fazer essa avaliação de desempenho na conversão de eletricidade e energia térmica, de custos e disponibilidades de tecnologias dos módulos fotovoltaicos padrões, de coletores solares e dos módulos PVT, tomando a cidade de Recife, Pernambuco, Brasil, como área de estudo. Por meio da pesquisa bibliográfica e do contato com empresas, foi possível realizar essas comparações e com base em alguns parâmetros para normalizar os cálculos de todos os sistemas analisados, concluindo-se, portanto, que, de acordo com os resultados, o sistema híbrido PVT possui algumas desvantagens econômicas que influenciam bastante na análise, afetando diretamente na sua viabilidade. Com isso, observa-se, assim, que os coletores híbridos fotovoltaicos ainda estão em processo de lapidação e em seus momentos iniciais no mercado de energia solar.

Palavras-chave: Avaliação do comportamento térmico e elétrico; Coletor solar térmico; Módulo fotovoltaico; Módulo PVT.

ABSTRACT

Every year, technologies related to the use of solar energy gain more space in all areas of our society, whether in the energy market, in specialized research and even in the media. This is because, due to technological advances, humanity is gradually acquiring more and more efficiency in the use of this solar energy, as well as in reducing the manufacturing costs of the equipment in question. These equipments, which we currently find in different types, sizes and formats, can convert solar energy into thermal, electrical or even a junction of these, thus generating energy simultaneously. In this way, the photovoltaic thermal hybrid collectors (PVT) have been gaining even more prominence in this area, since the aggregation of the technology of a solar collector and a photovoltaic module makes them have great potential in many applications. In this context, it is important to make comparisons of these new technologies with conventional ones, in which they are already known and consolidated in the energy market. Thus, the main objective of this monograph is to perform this evaluation of performance in the conversion of electricity and thermal energy, costs and availability of technologies of standard photovoltaic modules, solar collectors and PVT modules, taking the city of Recife, Pernambuco, Brazil, as an area of study. Through bibliographic research and contact with companies, it was possible to make these comparisons and based on some parameters to normalize the calculations of all analyzed systems, concluding, therefore, that, according to the results, the hybrid PVT system has some economic disadvantages that greatly influence the analysis, directly affecting its viability. With this, it is observed that the photovoltaic hybrid collectors are still in the process of lapidation and in their initial moments in the solar energy market.

Keywords: Evaluation of thermal and electrical behavior; Thermal solar collector; Photovoltaic module; PVT module.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxo de energia no coletor solar	10
Figura 2	Tipos de coletores apresentados em função de suas temperaturas de operação e aplicações	11
Figura 3	Célula fotovoltaica de silício cristalino e o efeito fotovoltaico	14
Figura 4	Esquema dos componentes de um painel fotovoltaico de células de silício cristalino	15
Figura 5	Classificação de sistemas que utilizam módulos PVT	16
Figura 6	Tipos de módulos PVT – água. (A) Placa e tubo. (B) Canal. (C) Escoamento livre. (D) Dois absorvedores.	18
Figura 7	Seção transversal de um módulo PVT – água do tipo placa e tubo	19
Figura 8	Visão global do sistema híbrido da UNICAMP	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classificação dos coletores térmicos em função da temperatura de operação	12
Tabela 2	Eficiência de diferentes tipos de células fotovoltaicas	13
Tabela 3	Levantamento dos custos de instalação de módulos fotovoltaicos e coletores térmicos em diferentes empresas do mercado	27
Tabela 4	Especificações e custos iniciais com cada sistema solar	32
Tabela 5	Estimativa da geração de energia, em kWh, por ano	33
Tabela 6	Ganhos com a produção de energia em reais	33
Tabela 7	Ganho total no fim da produção de energia, em reais, para diferentes estados	34
Tabela 8	Lucros líquidos e <i>payback</i> das tecnologias solares	35

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício Amorfo
BEN	Balanço Energético Nacional
BIPV	Building Integrated Photovoltaics
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
c-Si	Silício Monocristalino
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EVA	Etil Vinil Acetato
FV	Fotovoltaico
SAS	Sistemas de Aquecimento Solar
pc-Si	Silício Policristalino
PV	Photovoltaic
PVT	Photovoltaic Thermal

1. Introdução

O aumento do aquecimento global, reservas finitas de combustíveis fósseis e muitas outras questões ambientais, estão levando o mundo inteiro a buscar novos meios para substituição das formas poluentes de geração de energia que afetam tanto o meio ambiente.

Dessa forma, as energias renováveis são alternativas mais sustentáveis e ótimas para solucionar boa parte dessa problemática, de modo que temos a energia solar ganhando espaço cada vez mais e mais, com o passar dos anos. Nos dias atuais, os processos mais usados para aproveitamento da energia solar são o aquecimento de fluidos e a produção direta de energia elétrica a partir de células fotovoltaicas. Para fins de engenharia, pode-se falar da energia solar térmica e energia solar fotovoltaica (CRESESB, 2014).

Internacionalmente, o uso da energia solar é bastante importante. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o aumento da capacidade instalada de aquecedores solares de água e painéis fotovoltaicos se deve aos fortes incentivos de países como Israel, Espanha, Índia, Coreia, China e Alemanha, lugares que até foram implantadas exigências para uma certa aplicação mínima em aquecimento de água. Como consequência, muitos desses países estão no topo do ranking de capacidade instalada, com relação à geração de eletricidade por meio dessa fonte, onde se concentram os maiores investimentos e pesquisas.

De acordo com uma pesquisa realizada pela Bloomberg New Energy Finance (BNEF), os investimentos em energia renovável totalizaram US\$ 303,5 bilhões em 2020, um aumento de 2% em relação a 2019, mesmo com o impacto da pandemia de Covid-19. O estudo da BNEF observou que esse aumento foi resultado da maior expansão já feita na tecnologia fotovoltaica, a fonte de energia renovável que mais cresceu em 2020, com 132 GW de nova capacidade adicionada.

Com relação ao cenário nacional, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), o Brasil possui uma matriz elétrica prioritariamente renovável, com foco na geração hidrelétrica, tendo um crescente aumento nessa participação de outras fontes, como a biomassa, energia eólica, seguida da energia solar, sendo as que mais se expandiram nos últimos anos, condizente com o cenário mundial em que ocorre o mesmo movimento. O investimento em tecnologia solar térmica, apesar de ainda ser pequeno comparado aos outros países onde a radiação é significativamente menor, está aumentando nos últimos anos.

A maior vantagem do uso da energia solar é que ela é energia limpa. Ibrahim et al., 2011 listou algumas dessas vantagens que o uso de Energia solar, seja térmica ou fotovoltaica

proporcionam. Algumas das vantagens é a não geração de ruídos ou resíduos indesejados, alto desempenho, alta confiabilidade e baixa manutenção.

Além disso, temos uma nova tecnologia na qual é um dos pilares desse trabalho, o coletor híbrido térmico fotovoltaico (PVT), que consegue nos fornecer mais vantagens ainda, podendo ser visto, como exemplo, a gigantesca diferença na geração de energia total (Elétrica e Térmica) por área e um menor custo de instalação, por se tratar apenas de um só sistema, já que existe a geração simultânea em uma área muito menor, se comparado com a aplicação das duas tecnologias separadas, que ocuparia um espaço bem maior. Ademais, vemos que, com a grande quantidade de edifícios nas zonas urbanas, tem-se diminuído a área sem sombreamento, sendo de suma importância o aproveitamento dessas espaços ao máximo.

Desse modo, o trabalho elaborado trata-se de um estudo comparativo entre esses modelos convencionais utilizados simultaneamente, com relação ao módulo PVT. Entretanto, não se restringindo apenas às diferenças de eficiência, mas também na parte econômica e na diversidade de tecnologias que já se encontram no mercado, não desconsiderando as novas em desenvolvimento.

Na próxima seção, irão ser citados, de forma sucinta, objetivos, a literatura que é necessária para um melhor entendimento do estudo deste conteúdo, tendo na sequência as metodologias adotadas nas comparações do trabalho de conclusão de curso. Posteriormente, também há um tópico para os resultados obtidos, assim como outro para as conclusões e perspectivas de forma geral dessa temática. Por fim, há uma finalização com os agradecimentos e referências dos materiais e artigos baseados na elaboração do trabalho.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos Gerais

Analisar os coletores solares tipo PVT e comparar com um sistema simultâneo formado por coletores planos e módulos fotovoltaicos, de forma energética e econômica.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar revisão sobre coletores híbridos PVT;
- Analisar a eficiência dos coletores PVT e comparar com coletores planos e módulos fotovoltaicos;
- Analisar economicamente o uso de coletores híbridos em comparação com os coletores planos e os módulos fotovoltaicos.

2. Pesquisa Bibliográfica

Neste capítulo, é apresentada uma revisão de literatura sobre energia solar. Organizado, respectivamente, nas seguintes subseções: Energia solar térmica, fotovoltaica e coletores solares híbridos que constituirão a base para um melhor entendimento do trabalho em questão.

2.1 Energia solar térmica

A energia solar térmica é uma maneira de utilizar a energia proporcionada pelo sol em calor. Em que, se tem alguns fluidos que podem ser utilizados, como água para aplicações de aquecimento de piscinas ou uso doméstico. Também é possível usar Sistemas de Aquecimento Solar (SAS) ou ar para o aquecimento de ambientes, ou até mesmo óleos e sais, onde tem o objetivo de gerar vapor para geração de energia elétrica em usinas termossolar.

Seja no Brasil ou no mundo, aquecedores solares de água em baixa temperatura, para uso residencial e industrial, tornaram-se a aplicação mais utilizada de energia solar térmica. O consumo de energia elétrica pode ser reduzido devido à substituição dos aquecedores convencionais pelos aquecedores solares (GUERRA, 2016).

O funcionamento da tecnologia solar para aquecimento de água em baixa temperatura baseia-se no princípio de conversão térmica da energia do sol, via da absorção da radiação solar incidente em um plano absorvedor e da transferência da energia absorvida, na forma de calor, para a água que recebe a energia útil (MIRANDA, 2021).

A temperatura que a água atinge é oriunda da energia útil resultante de um balanço de energia entre a quantidade as perdas térmicas existentes durante o processo de transferência de calor e a radiação absorvida pela superfície. Com isso, a energia útil, assim como a temperatura, aumenta na medida em que se eleva a radiação absorvida pela superfície absorvedora e se diminuem as perdas térmicas do sistema como é retratado na Figura 1 (GUERRA, 2016).

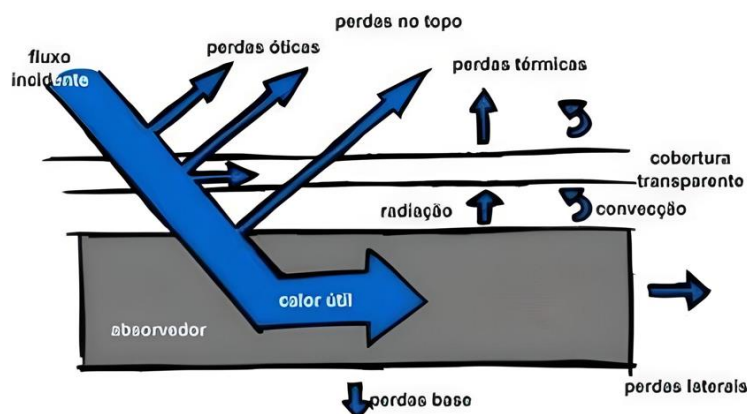


Figura 1. Fluxo de energia no coletor solar (fonte: MIRANDA, 2021).

A radiação solar incidente nos coletores pode ser transmitida, absorvida e refletida. Dessa forma, a transmissividade, refletividade e absortividade são propriedades que influenciam o comportamento dos materiais sob a ação da luz do sol, tendo associação, desse modo, com as perdas óticas do sistema. Logo, segundo Coelho (2011), a energia incidente pode ser considerada como o somatório da energia absorvida, transmitida e refletida, citadas anteriormente.

Já com relação às perdas térmicas existentes na conversão solar térmica, essas podem ser associadas ao processo de transferência de calor. Sendo assim, pode-se afirmar que as perdas podem ocorrer por meio da condução, convecção ou radiação.

No caso do coletor solar, a transferência de calor por convecção ocorre entre a cobertura transparente e o ar ambiente e também entre a placa absorvedora e a cobertura transparente. Mas, essas perdas podem ser reduzidas, através da limitação do escoamento do fluido entre as superfícies. Com o objetivo de evitar as perdas por condução, devem-se utilizar isolantes térmicos, compostos por materiais de baixa condutividade térmica. As perdas térmicas por radiação ocorrem quando parte da energia absorvida pela placa absorvedora do coletor é emitida e podem ser minimizadas através da utilização de uma cobertura transparente acima da superfície absorvedora, como o vidro (GUERRA, 2016).

Os coletores são classificados em coletores concentradores e coletores planos. De acordo com Pinho, 2014, os coletores concentradores têm suas aplicações associadas a temperaturas superiores a 100°C , podendo chegar até temperaturas de até 3.000°C . Já os coletores planos, são indicados para aplicações à baixa temperatura de operação, entre 60°C e 100°C . As aplicações dos coletores solares planos são as mais diversas, que incluem aquecimento de água residencial, de piscinas, limpeza, e ar quente para secagem de grãos. Um esquema relacionando os coletores com suas temperaturas de operação e suas aplicações podem ser vistos na Figura 2.

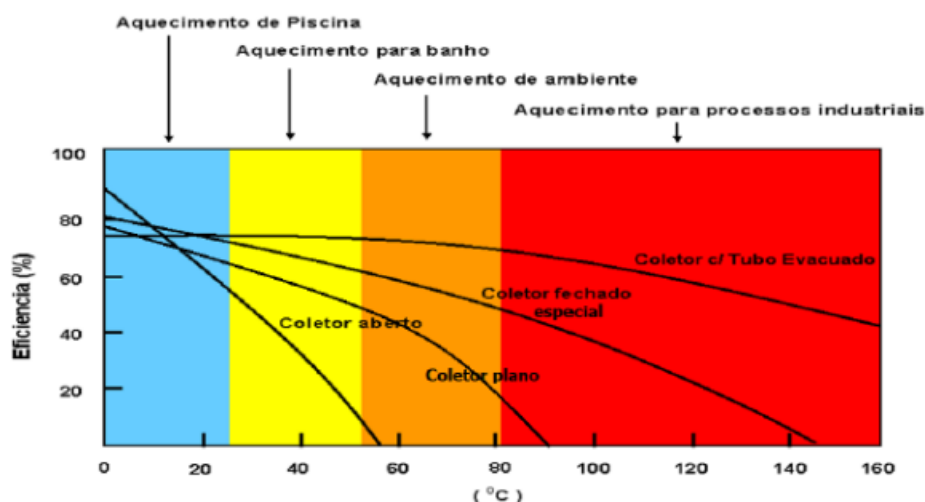


Figura 2. Tipos de coletores apresentados em função de suas temperaturas de operação e aplicações (fonte: PEREIRA, 2018).

Coletores sem cobertura, que consistem apenas em uma placa absorvedora possuem a menor eficiência entre os coletores, principalmente pelo fato de não terem uma cobertura, revestimento e isolamento térmico. As perdas de calor são elevadas, porém, é menos custoso pela simplicidade do sistema.

Além disso, tem-se os coletores planos, que são coletores constituídos por uma placa absorvedora acondicionada dentro de uma caixa retangular e com uma cobertura transparente, na maioria dos casos, de vidro. Dessa forma, conseguem ter uma menor perda das energias e, conseqüentemente, mais eficiência se comparado com os de sem cobertura.

Também, existem os coletores do tipo parabólicos compostos, que são equipamentos para a concentração da radiação solar para a obtenção de temperaturas mais elevadas. Por possuírem perdas térmicas baixas e um sistema duplo de absorção e um sistema de reflexão responsável por concentrar a radiação em um determinado local do dispositivo, são muito recomendados para aplicações que necessitam de uma temperatura de fluido maior que dos coletores planos.

Outro tipo de coletor solar são os de tubo evacuado, que possuem tubos ligados entre si, pela parte superior através de um distribuidor (ou cabeçote), onde se localizam as linhas de abastecimento e retorno.

Para Pereira (2018), os coletores térmicos em função de suas temperaturas de operação, podem ter uma classificação ainda mais específica e destrinchada, de modo que a Tabela 1 representa tais classificações.

Tabela 1. Classificação dos coletores térmicos em função da temperatura de operação (fonte: Adaptado por ESTIVALETE, de PEREIRA, 2018).

Movimento	Tipo de coletor	Tipo de absorvedor	Razão de concentração	Faixa de temperatura
Estacionário	Coletor Plano	Plano	1	30 - 65
	Coletor Plano Especial	Plano	1	30 - 90
	Tubo Evacuado	Plano	1	50 - 200
Rastreamento 1 - eixo	Concentrador Parabólico Composto - CPC	Tubular	1 - 5/5 - 15	60 - 240/300
	Refletor Linear Fresnel	Tubular	10 - 40	60 - 250
		Tubular	10 - 80	60 - 400
Rastreamento 2 - eixo	Calha Cilíndrica	Tubular	15 - 40	60 - 300
	Calha Parabólica	Tubular	10 - 85	60 - 400
	Refletor tipo – dish	Ponto Focal	600 - 2.000	100 - 1.500
	Campo de heliostatos	Ponto Focal	300 - 1.500	150 - 2.000

2.2 Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica possibilita a conversão direta da radiação solar em eletricidade, por meio dos módulos fotovoltaicos. Edmond Becquerel relatou o fenômeno em 1839, quando nos extremos de uma estrutura de matéria semicondutora surge o aparecimento de uma diferença de potencial elétrico, devido à incidência da luz. Segundo SOUSA (2013), no processo de conversão da energia radiante em energia elétrica, têm-se como elemento fundamental a célula fotovoltaica. Esses módulos podem ter diferentes tamanhos e formatos, proporcionando uma vasta gama de aplicações para eles, além disso, as células dispõem de várias possibilidades de tecnologias e materiais diferentes para sua formação. A Tabela 2 apresenta as eficiências das melhores células fotovoltaicas fabricadas em laboratório até 2012.

Tabela 2. Eficiência de diferentes tipos de células fotovoltaicas (fonte: PINHO, 2014).

Tecnologia		Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	$25,0 \pm 0,5$
	Policristalino	$20,4 \pm 0,5$
	Filmes Finos Transferidos	$20,1 \pm 0,4$
Compostos III A-VA (ou 13-15)	GaAs (filme fino)	$28,8 \pm 0,9$
	FaAs (policristalino)	$18,4 \pm 0,5$
	InP (monocristalino)	$22,1 \pm 0,7$
Calcogênios Compostos II B-VI A (ou 12-16)	CIGS (filme fino)	$19,6 \pm 0,6$
	CdTe (filme fino)	$18,3 \pm 0,5$
Silício amorfo/ nano cristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	$10,1 \pm 0,3$
	Nanocristalino (nc-Si)	$10,1 \pm 0,2$
Células Sensibilizadas por Corantes (DSSC)		$11,9 \pm 0,4$
Células Orgânicas (filme fino)		$10,7 \pm 0,3$
Multijunção	InGaP/GaAs/InGaAs	$37,7 \pm 1,2$
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	$13,4 \pm 0,4$

As células fotovoltaicas são feitas a partir de materiais semicondutores, isto é, materiais com propriedades intermediárias entre condutores e isolantes. O silício geralmente vem na forma de areia e, através de métodos adequados, o silício puro pode ser obtido. Cristais de silício puro não têm elétrons livres e, portanto, são maus condutores elétricos. Para alterar isso, porcentagens de outros elementos são adicionadas. Esse processo é chamado de dopagem (NASCIMENTO, 2004).

Da dopagem do silício com o fósforo, obtém-se um material com elétrons livres ou materiais com portadores de carga negativa, denominado de silício tipo N. Realizando o mesmo processo, mas agora acrescentando boro no lugar do fósforo, obtém-se um material com características inversas, isto significa, falta de elétrons ou material com cargas positivas livres, o silício tipo P (MIRANDA, 2021). Cada célula solar compõe-se de camada fina de material tipo N e outra mais espessa de material tipo P, conforme mostrado na Figura 3.

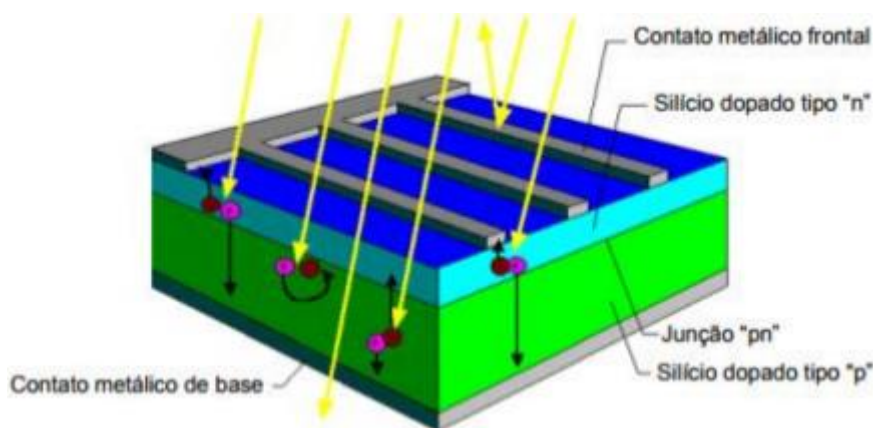


Figura 3. Célula fotovoltaica de silício cristalino e o efeito fotovoltaico (fonte: NASCIMENTO, 2004).

Caso as capas estejam separadas, elas são eletricamente neutras. Mas, ao serem unidas, na região P-N, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que vão para os vazios da estrutura do silício tipo P. Com a incidência de luz sobre a célula fotovoltaica, os elétrons da estrutura do silício são transformados em condutores, pelo fato da energia fornecida por fótons ao se chocar com eles. Por conta do campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada “P” para a camada “N” (NASCIMENTO, 2004).

Por meio de um condutor externo, com a ligação da camada negativa à positiva, gera-se um fluxo de elétrons, nesse caso, conhecida como corrente elétrica. Enquanto a luz incidir na célula, o fluxo de elétrons se mantém. A intensidade oscila proporcionalmente conforme a intensidade da luz que incide, tornando-o inesgotável. Este fenômeno descrito é chamado de efeito fotovoltaico (SILVA, 2014).

Segundo MIRANDA (2021), como a produção de eletricidade de uma célula fotovoltaica dessa é baixa, é necessário o agrupamento de várias dela para aumentar essa produção, caracterizando, assim, esse agrupamento como módulo fotovoltaico, ou também denominado como painel fotovoltaico, em que essa união permite a composição de um arranjo fotovoltaico.

É importante tentar obter maiores valores para corrente elétrica de um sistema como esse, visto que a corrente elétrica está diretamente relacionada com a quantidade de luz recebida. Com isso, quanto maior a área, maior a incidência de luz e, consequentemente, maior a corrente elétrica fornecida (GUERRA, 2016).

Um módulo pode ser formado por um conjunto de 36 a 216 células fotovoltaicas associadas em série e/ou paralelo, onde deve ser analisado os parâmetros elétricos, como tensão, corrente e potência, de acordo com a aplicação em contexto do módulo, para saber qual

é a melhor associação possível. Estas células são soldadas em tiras e depois de soldadas, as células são encapsuladas, a fim de protegê-las das intempéries e proporcionar resistência mecânica ao módulo fotovoltaico (CRESESB, 2014).

Os módulos fotovoltaicos são formados 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), que é um material plástico que serve para proteger a próxima camada do sistema, que são as células de silício. Depois, outra camada de EVA é colocada, seguida 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 servir como isolante e proporcionar rigidez. Os painéis geralmente são revestidos por uma moldura de alumínio para dar resistência e proteção (RIBEIRO, 2016). Conforme ilustrado na Figura 4.

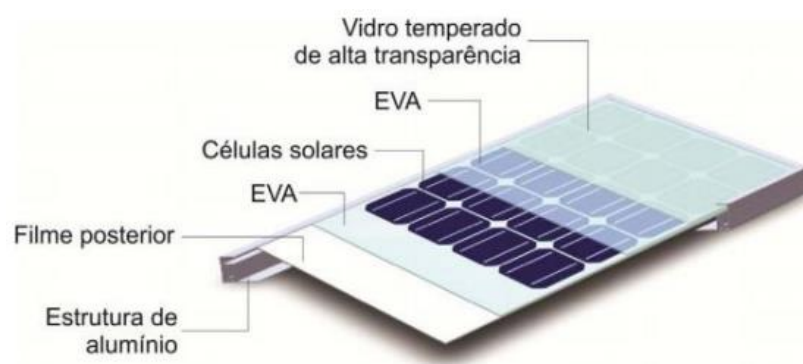


Figura 4. Esquema dos componentes de um painel fotovoltaico de células de silício cristalino (fonte: CRESESB, 2014)

2.3 Coletores Solares Híbridos

O coletor solar híbrido é uma tecnologia que converte simultaneamente a radiação solar em eletricidade e calor, isto é, combina o coletor solar térmico e fotovoltaico. Basicamente, é a adição de uma camada absorvedora, extraíndo energia térmica do sistema e arrefecendo o módulo, proporcionando, assim, uma maior eficiência para ele. Ainda, essa energia térmica que é utilizada e aqueceu a água ou ar pode ser utilizada também (MARQUES, 2008).

Este tipo de coletor gera uma quantidade de energia elétrica e térmica por m^2 superior a uma instalação separada das duas tecnologias. Em situações que a área é reduzida, é bem mais vantajoso a aplicação dela e, do ponto de vista estético, o coletor híbrido possui uma solução mais harmoniosa. Ademais, temos que, por ser apenas um tipo de coletor que é instalado, em vez de dois, o custo de instalação também é menor (ANCINES, 2016).

De acordo com Tyagi (2012), existem as mais variáveis formas de integração PVT, podendo ter diversos tipos de fluidos e aplicações, só quanto a parte do coletor térmico. Já as células fotovoltaicas que compõem os módulos PVT podem ser feitas de silício monocristalino, policristalino, amorfo ou de filmes finos. Com relação à geometria, pode-se encontrar placa plana absorvedora ou com concentrador. Além disso, nada impede que também sejam módulos PVT com ou sem cobertura, com fluido com escoamento natural, com escoamento forçado, autônomo ou integrado a edificações. Os módulos PVT, nos sistemas convencionais, são classificados em termos do fluido de trabalho de seu sistema. Entretanto, diversos autores sugeriram uma classificação mais abrangente. Segundo Sathe e Dhole (2017), por exemplo, esses módulos nos chamados sistemas novos, podem ser classificados de acordo com as principais aplicações de cada um, como é mostrado na Figura 5.

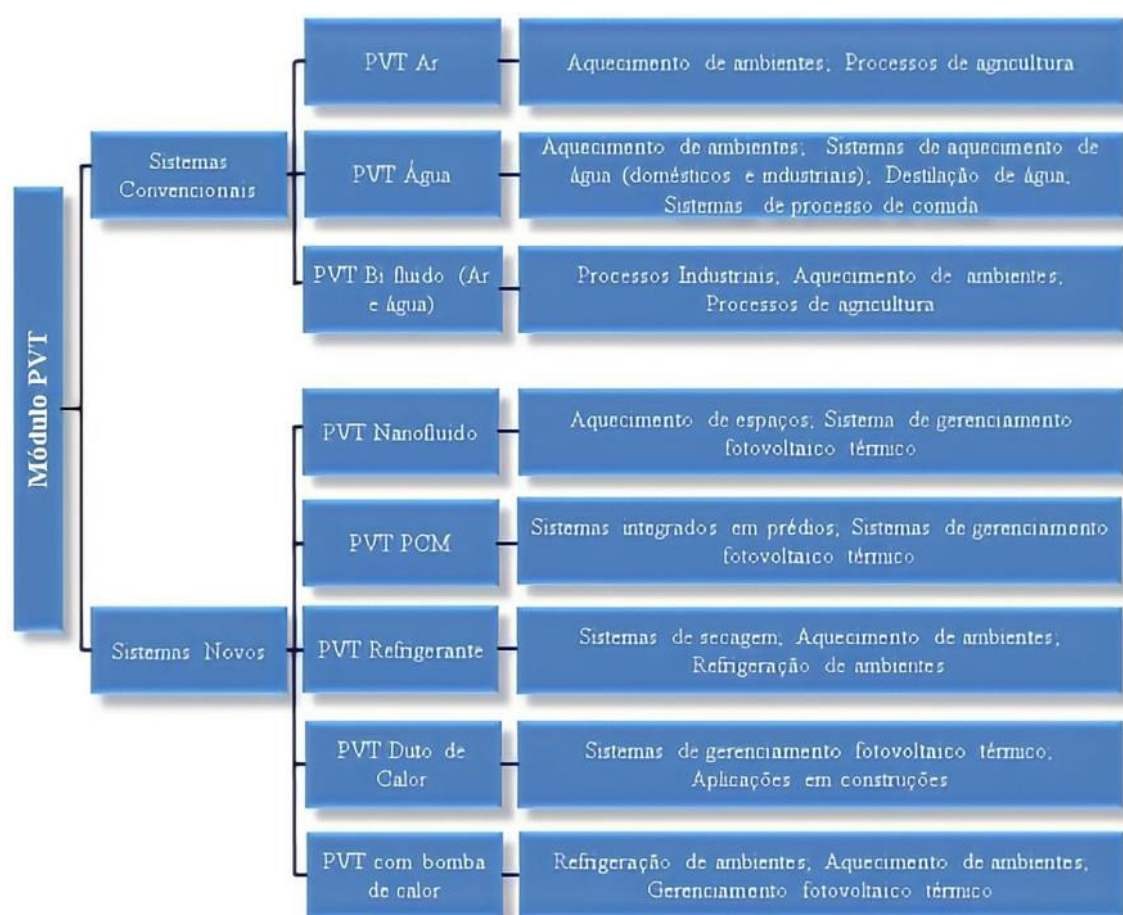


Figura 5. Classificação de sistemas que utilizam módulos PVT (fonte: Adaptado por ESTIVALETE, de SATHE e DHOBE, 2017).

Elbreki (2016), listou vários parâmetros que influenciam em um projeto de módulo híbrido. Eles foram classificados da seguinte forma: parâmetros climáticos, de projeto e operacionais. Além disso, nesse mesmo estudo, os autores avaliaram o quanto cada eficiência era impactada por essas variáveis e a relação entre as mesmas, concluindo que a eficiência

global é dependente, sobretudo, da eficiência térmica, e em menor proporção da eficiência elétrica.

2.3.1 Módulo PVT bi fluido

Os módulos PVT bi fluido são aqueles onde há mais de um fluido sendo usado, simultaneamente, como fluido de trabalho, geralmente água e ar. Tem como ponto forte cessar as usuais desvantagens dos dois sistemas separados. Dessa forma, busca garantir um maior resfriamento do módulo FV, através do aquecimento dos dois, e, consequentemente uma maior eficiência elétrica. Ainda não se tem muita informação com detalhes sobre esses sistemas, já que as utilizações são um pouco limitadas e a literatura especializada não aparece com muita frequência. A classificação desse tipo de módulo PVT é dada pelo padrão de escoamento dos dois fluidos de trabalho, conforme estabelecido por Zondag et al. (2003).

Também, Sathe e Dhobe (2017), reforça que a hipótese do uso de dois fluidos deveria garantir uma alta eficiência elétrica. Mas, esse sistema possui uma baixa eficiência térmica, o que traz como consequência aplicações limitadas.

2.3.2 Módulo ar

Os módulos PVT - ar utilizam somente o ar como fluido de trabalho, que aquece e arrefece as células fotovoltaicas. Podem ser divididos em dois tipos: Os módulos fotovoltaicos integrados, onde o conjunto de células fotovoltaicas, que formam o módulo, são arrefecidas via de uma passagem na cobertura superior; e os módulos fotovoltaicos de recuperação de calor, também chamados de Building Integrated Photovoltaics, BIPV, nos quais as células fotovoltaicas que constituem o módulo são fixadas no exterior de edificações, tornando-se um grande painel (ESTIVALETE, 2018).

No primeiro tipo, os módulos fotovoltaicos integrados possuem um tubo para o escoamento do ar aquecido, com aberturas nas partes extremas da estrutura. No segundo tipo, o grande painel está em contato direto ao ambiente e o mesmo é arrefecido por meio da convecção natural. Em ambos os casos, podem haver situações em que a convecção é forçada.

Segundo Tyagi (2012), a utilização do segundo tipo é uma solução mais prática, visto que há um uso mínimo de materiais e com baixo custo de operação. Para Tripanagnostopoulos et al. (2005), a utilização do primeiro tipo de módulo tem menor eficiência em regiões de baixa latitude, já que na maior parte do ano as temperaturas estão mais elevadas, tornando o sistema ineficaz, pois não há uma boa redução da temperatura do arranjo fotovoltaico.

2.3.3 Módulo água

Esse tipo de módulo é o qual se tem mais informações e pesquisas relacionadas. Segundo Estivalete (2018), esse tipo consiste, usualmente, em uma placa absorvedora com uma serpentina acoplada, ou soldada, (muito semelhante a placa de um coletor térmico de placa plana) associada a um módulo FV.

Quando comparado a outros tipos de módulos PVT, esse é mais hermético, devido às partes que constituem o mesmo. De acordo com Zondag et al. (2003), identificaram-se os nove exemplares mais estudados e os classificaram em quatro agrupamentos, em termos de seus cortes transversais. Essas quatro divisões são denominadas segundo a legenda apresentada, que segue a Figura 6, onde ilustra o que foi citado agora.

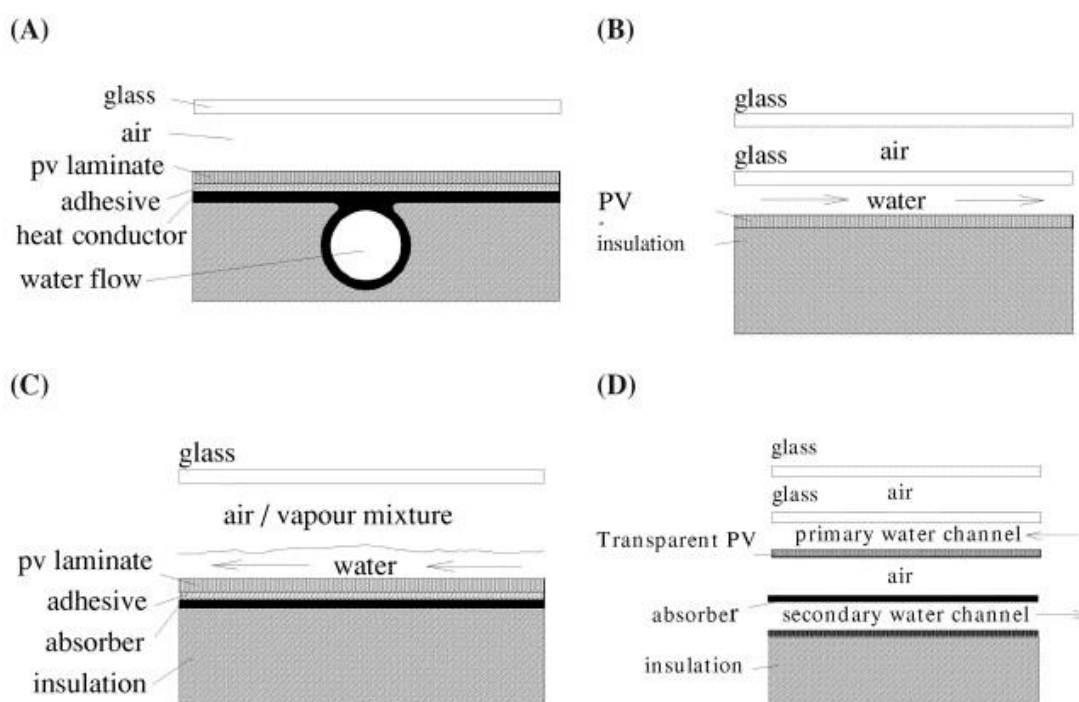


Figura 6. Tipos de módulos PVT – água. (A) Placa e tubo. (B) Canal. (C) Escoamento livre. (D) Dois absorvedores. (fonte: ZONDAG, 2003).

Analisando o coletor do tipo placa e tubo, Chow, 2003, descobriu que a absorvidade da placa de absorção e a qualidade do contato (ou solda) entre o módulo FV e a placa são muito importantes para a eficiência global do sistema. Os tubos, usualmente de metal, são fixados ao painel por meio de uma ligação que conduz o calor para a água. A eficiência é otimizada se reduzir ao máximo os espaços, ou bolsões de ar, entre esses tubos e o painel. Conforme apresentado na Figura 8, temos a estrutura do painel PVT estudado por Kalogirou e Tripanagnostopoulos (2006).

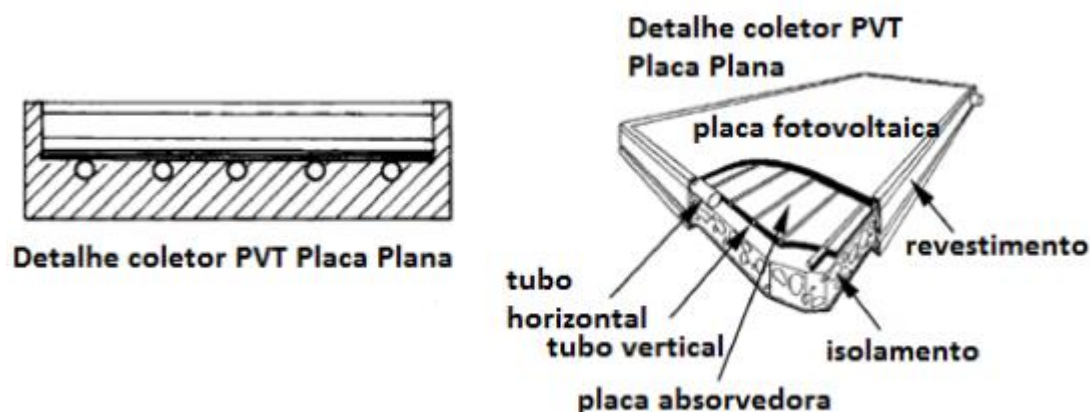


Figura 7. Seção transversal de um módulo PVT – água do tipo placa e tubo (fonte: Adaptado de KALOGIROU e TRIPANAGNOSTOPOULOS, 2006)

3. Revisão Histórica e Proposição do Problema

Segundo a pesquisa realizada por Viana (2014), o primeiro cientista a realizar um trabalho sobre esses tipos de coletores híbridos foi Martin Wolf em 1976, onde ele concluiu que era viável um módulo como esse para a cogeração de energia elétrica e térmica para usos residenciais.

Ademais, estudos realizados por Florschuetz (1979) apresentam um modelo computacional para simulação de um coletor PVT utilizando água como fluido de trabalho para coletores planos. Neste modelo, analisa-se a combinação das duas tecnologias já conhecidas naquela época, com o objetivo de diminuir a área de todo sistema para geração dos dois tipos de energia, tanto a elétrica, quanto a térmica. A simulação apontou que essa junção dos dois sistemas com a mesma área de coletor produz mais energia por unidade de área de superfície do que num sistema separado.

Bergene e Lovvik (1995) pegaram um módulo PVT com a água como fluido para avaliar o seu desempenho. Neste trabalho, a eficiência total do sistema oscilou em torno de 60% e 80%. Além disto, foi descoberto mais um fator que influencia na eficiência de todo esse sistema, que é a quantidade de água que há no tanque. Onde, quanto mais água houver, menor é a temperatura de saída dela e, conseqüentemente, aplicação limitada para a água utilizada (RIBEIRO, 2016).

Tripanagnostopoulos et al. (2001) fizeram testes em sistemas híbridos PVT usando células fotovoltaicas de silício policristalino e de silício amorfo. Os autores descobriram que usar água como fluido de trabalho funcionou melhor do que usar ar.

Já no estudo de Sandnes e Rekstad (2001), investigou-se o desempenho de coletores térmicos com células solares de silício com uma camada de polímero adicional cuja função é absorver calor. A análise realizada mostra que a presença de células solares reduz a absorção térmica da radiação solar em aproximadamente 10% e que a camada de vidro temperado reduz a eficiência óptica em aproximadamente 5%. Por fim, os autores descobriram que para obter o efeito de resfriamento desejado, a tecnologia PVT é limitada a aplicações de baixa temperatura.

Como já citado na seção anterior, Zondag et al. (2003) com o objetivo de ter uma visão mais verdadeira sobre o desempenho esperado dos diversos tipos de coletores, reuniu os nove diferentes tipos de painéis híbridos para análise. O projeto que teve melhor eficiência e com fácil fabricação foi o coletor de chapa e tubo plano. No seu trabalho foi mostrado que, para um coletor combinado térmico fotovoltaico, a eficiência total, quando a temperatura de entrada for semelhante a temperatura ambiente, é superior a 50%.

Zondag et al. (2003) também concluíram que o coletor PVT tem um desempenho mais elevado por unidade de área do que um coletor solar térmico e um módulo fotovoltaico, desassociados. Eles também obtiveram, no seu estudo sobre rendimento de diferentes tipos de coletores combinados PVT, valores de 35% e 8% para as eficiências térmica e elétrica.

Mais adiante Chow et al. (2006) elaboraram um coletor PVT de caixa plana em liga de alumínio e com arrefecimento através da circulação natural. Eles observaram que a água atingiu valores elevados de temperaturas, depois de um dia exposto ao sol, mostrando assim, ser efetivo para fins domésticos. Também foi feito um modelo numérico preciso, validado por meio dos dados medidos nos testes experimentais.

Khandelwal et al. (2007) concluíram, a partir de simulações e experimentos para dois tipos de coletores híbridos, que o sistema PVT produz eficiências térmicas e elétricas na ordem de 30-35% e 7-12%, respectivamente.

Marques (2008) avaliou a viabilidade econômica de coletores PVT para uma casa com quatro pessoas situada em três cenários de climas diferentes em Portugal. Neste artigo, 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. A partir dos modelos numéricos desenvolvidos, Marques (2008) concluiu que o coletor PVT placa-tubos com cobertura possui o melhor desempenho térmico, que teve a ideia reforçada em seu experimento. Porém, o coletor híbrido com placa e tubos sem cobertura tem o rendimento elétrico maior. Concluindo, o autor ainda ressaltou que o tipo de célula FV utilizado no módulo influenciava nos resultados obtidos, visto que o tipo monocristalino gerou mais energia elétrica do que o tipo policristalino.

Já Almeida (2008) com o auxílio de um modelo matemático, ele avaliou diferentes tipos de coletores híbridos e por meio disso, obteve curvas de desempenho. No seu estudo concluiu que os coletores PVT com células monocristalinas são economicamente mais viáveis, por ter um retorno do investimento mais curto e por ter a sua capacidade de produzir entre 26% e 31% a mais de energia elétrica do que um painel FV convencional com a mesma área e potência instalada.

No Brasil, o primeiro modelo de sistema híbrido que foi desenvolvido, veio da Universidade Estadual de Campinas (OLIVEIRA;FRATESCHI, 2013). O protótipo era formado por um coletor solar ligado na traseira de um módulo fotovoltaico, onde permitia uma certa alteração na angulação desse sistema, no qual possuía até mesmo um boiler para o armazenamento de água quente. Conforme esquematizado na Figura 9 a seguir.

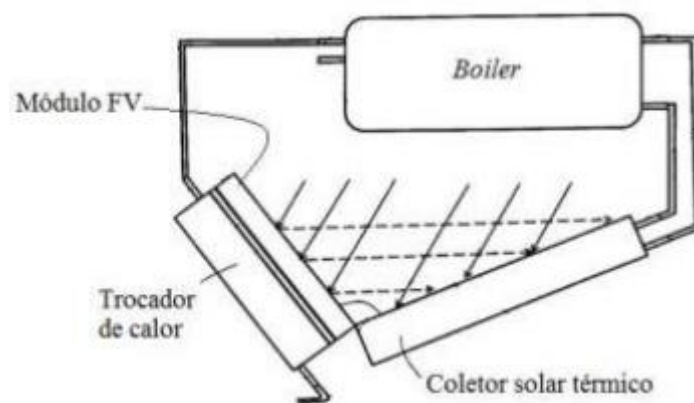


Figura 8. Visão global do sistema híbrido da UNICAMP (fonte: GUERRA, 2016).

Depois, Viana (2014) fabricou um coletor híbrido com o objetivo de avaliar sua viabilidade econômica e técnica. O sistema foi analisado experimentalmente em alguns dias consecutivos e de acordo com os resultados obtidos, a eficiência térmica média do coletor foi de 33,1 % e a eficiência elétrica média de 6,8%. Deste modo, o autor concluiu ser viável a aplicação dessa tecnologia no setor residencial, já que ela reduz bastante o tempo de retorno do investimento e aproveita bastante a área na qual é instalada o coletor.

Recentemente, MIRANDA (2021) elaborou uma análise do desempenho de um coletor solar híbrido em um sistema de produção simultânea. Os resultados indicaram que o coletor fotovoltaico térmico operou com eficiências térmicas e elétricas médias de 34,4% e 11,3%, respectivamente.

Espera-se que o mercado de energia fotovoltaica/térmica cresça nos próximos anos devido ao potencial de produção de energia e a crescente preocupação com a proteção

ambiental. Por essas razões, é importante realizar pesquisas nessa área para que tais tecnologias possam ser comercializadas e disseminadas a preços acessíveis em um futuro próximo (MIRANDA, 2021).

Logo, diante de todos esses avanços e pesquisas, vê-se que é importante analisar e comparar as diferenças econômicas, operacionais e de disponibilidade, via consulta de literatura e mercado, desses tipos de módulos PVT, relacionando-os com as tecnologias convencionais simultâneas. Isso porque existe um constante desenvolvimento de todos esses dispositivos pelo Brasil e no restante do mundo ao longo dos anos, tornando-se necessária toda essa avaliação para saber em qual cenário se encontra essas tecnologias de sistemas solares híbridos nos dias atuais.

4. Metodologia

Nessa seção, é apresentado, em detalhes, a metodologia utilizadas para traçar as comparações necessárias dos módulos e coletores em questão, com subseções para organizar de uma melhor forma todo capítulo.

A pesquisa bibliográfica foi complementada por um levantamento de custos gerados e/ou economizados, com relação a cada tipo de equipamento, utilizando a cidade de Recife, Pernambuco, Brasil, como referência. Ademais, também foi realizado o contato com empresas do ramo de energia solar para obter valores de instalação e manutenção dos mesmos, e dessa forma, poderá ser feita as comparações energéticas e econômicas almejadas.

Nesse sentido, como serão realizados projetos de sistemas solares que estão diretamente ligados à geração distribuída, o trabalho deve seguir a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, que já teve algumas revisões e passou por algumas mudanças ao longo dos anos. Além disso, em 6 de janeiro de 2022 foi sancionado o Marco Legal da Geração Distribuída (Lei 14300/2022), que determina aos consumidores produtores de energia solar que passem a pagar a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD). Porém, entrará em vigor apenas em janeiro de 2023, logo, para os sistemas solares instalados antes disso, eles ainda terão as mesmas condições atualmente vigentes e previstas com a RN 482/2012. Com isso, essa monografia não considerou essa nova taxa em nenhum dos sistemas ou cálculos analisados nesse material, mas é importante ter ciência que após a inclusão da TUSD, os lucros e *paybacks* obtidos nesses investimentos, consequentemente, sofrerão impactos e seus valores serão um pouco reduzidos.

4.1. Parâmetros Adotados

Para definir quais parâmetros da residência, tomada como caso do estudo, também está sendo considerado a média desses valores. Onde, segundo o IBGE, no Brasil, temos aproximadamente uma média de 3 pessoas por domicílio.

Da mesma forma, de acordo com o Departamento Municipal de Água e Esgoto de Caldas Novas, se fechado o registro do chuveiro ao se ensaboar, em um banho de cinco minutos, cada pessoa consome cerca de 45 litros de água.

Sendo assim, como temos 3 pessoas, ao considerar que cada uma tomará 3 banhos por dia e que gastará 45 litros de água em cada um desses banhos, teremos que por dia essa casa irá ter um consumo de água nos banhos de 405 litros. Dessa forma, vê-se que um sistema térmico com um reservatório de água quente de 200 litros já consegue atender o dia de banho da família em questão, pois sabe-se que é recomendado a mistura da água aquecida pelos coletores com a água fria de outro reservatório, já que as temperaturas dessas águas quentes chegam a ser muito maiores que as recomendadas para banho, necessitando, assim, de uma mistura para o controle e diminuição dessa temperatura.

Com relação ao preço da energia elétrica no qual irá ser tomado como base, como a Neoenergia Pernambuco é a empresa concedente de energia para o estado de Pernambuco, é dela que irá ser adquirido as devidas cotações de energia. Dessa forma, para o grupo B1 – Residencial, que é usado como referência, segundo a tabela de tarifas de energia elétrica, publicado pela mesma, com vigência entre as datas de 24/04/2022 até 28/04/2023, e considerando a bandeira verde, onde não há alterações nos valores dessas taxas, temos uma tarifa de 0,7358 R\$/kWh.

Os custos e ganhos com energia em Pernambuco por conta desse preço que existe na Neoenergia também serão comparados com outras cotações de estados diferentes, para proporcionar uma análise superficial do comportamento dos valores que envolvem esses investimentos solares quando se tem preços menores ou maiores de energia. Por exemplo, pode ser que um investidor lucre mais com uma certa produção de energia, simplesmente pelo fato de estar em uma localidade onde o preço da energia é mais caro.

4.2. Coleta de dados e preços

De início, foi preciso colher as informações sobre cada equipamento, como, por exemplo, o quanto de energia cada tecnologia gera, ou nos fornece como economia, em reais (R\$), no valor final da conta de energia de uma residência mais comum em nosso país. Para isso, foi considerado a média de cada especificação do que se tem disponível no mercado, através de uma consulta em estudos apresentados em seções anteriores e também pelo contato com as empresas de energia solar que fornecem esses serviços, onde foi disponibilizado essas especificações técnicas de interesse desse trabalho.

Os valores de Irradiação Solar Média que serão utilizados nos cálculos nessa seção foram extraídos do SunData v3.0, disponibilizados no Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. Dados esses que são diferentes dependendo da coordenada, fazendo com que cada cidade tenha um valor de irradiação solar diferente, assim como preços de energias diferentes. Logo, considerando as cidades de Manaus (AM), Goiás (GO), São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ) e Florianópolis (SC), se torna interessante uma breve comparação dos respectivos resultados, que podem ser alcançados em cada uma delas, analisando as divergências e semelhanças desses valores com os da cidade de Recife (PE).

Com relação às estimativas de geração de energia, que serão listadas na próxima subseção, tem-se que, nos componentes fotovoltaicos, há apenas a necessidade de uma simples multiplicação entre a Irradiação Solar Média, do local, com a eficiência do equipamento fornecida nas especificações do fabricante.

Já para a parte térmica dos sistemas, percebe-se que, por ser energia térmica gerada, não é possível apenas multiplicar pelo preço da energia elétrica cobrada pela concedente de energia. Com isso, é preciso extrair a quantidade de energia térmica que é necessária para aquecer a água da temperatura de 25°C até 39°C. Pois, o site do Governo Federal Brasileiro, informa por meio do Ministério da Educação que, segundo Camilla de Barros Borges, o banho ideal é o banho morno, com temperatura entre 29°C e 38°C, pois se assemelha a nossa temperatura corporal. Acima de 38°C, já é considerado um banho quente, sendo assim, 39°C por ser próximo dessa faixa de temperatura, apresenta-se como um valor interessante para os banhos do estudo em questão.

Por meio da consulta na tabela termodinâmica das entalpias específicas da água, em kJ/kg, para as respectivas temperaturas, é possível obter um produto entre essa variação das entalpias e a vazão mássica correspondente ao banho de 5 minutos citado anteriormente. Esse produto é exatamente a energia térmica necessária, necessitando apenas de uma conversão de kJ para kWh. Sendo assim, verifica-se que para demanda de 240 banhos por mês, estimado para a residência de 3 pessoas onde cada uma tomará 3 banhos por dia, têm-se um valor de

175,56 kWh/mês de energia térmica necessária. Onde, veremos a seguir que todos os equipamentos do estudo possuem até mais que isso de geração de energia térmica, confirmando assim, que possuem a plena capacidade de fornecer essa economia de energia, substituindo os aquecedores elétricos, como chuveiros.

Além da demanda de energia térmica na utilização dos banhos, também é adotado uma piscina com 50 m² de área superficial, com 80.000 litros, para o aquecimento de suas águas. Onde, por meio de um balanço térmico de energia, no qual há uma igualdade entre a quantidade de energia perdida (em sua maior parte por convecção, desconsiderando os outros tipos de perdas) e a quantidade de energia fornecida pelo coletor. Desse modo, considerando que no período de 1 mês têm-se 2.592.000 de segundos, existe a possibilidade de dimensionar essa quantidade de energia necessária para o período interessado. Logo, ao calcular a fórmula expressa abaixo na Equação 1, obtém-se o valor da demanda de energia térmica que essa piscina necessitará para seu aquecimento ao longo do mês, considerando que terá um sistema para preservação de sua temperatura, evitando o máximo de perdas possíveis com a convecção natural nos momentos de baixa produção de energia solar, como é o caso do período noturno, por exemplo.

$$Q_A = Q_P = \frac{(h \cdot A \cdot \Delta T) \cdot 2.592.000}{3,6 \cdot 10^6} \quad (1)$$

Onde,

Q_A – Energia térmica p/ aquecimento (kWh)

Q_P – Energia térmica perdida por convecção natural (kWh)

h – Coeficiente de convecção natural (J/m²· K · s)

A – Área da piscina (m²)

ΔT – Variação da Temperatura (°C)

Na Equação 1, temos o valor de aproximadamente 10 J/m²· K · s para h , e também uma divisão por $3,6 \cdot 10^6$ que é apenas a conversão de J (Joules) para kWh. Já com relação a temperatura final ideal para banhos em piscinas recreativas residências, tem-se que há vários intervalos de temperatura defendidos pelos diferentes especialistas, podendo até utilizar temperaturas como as de banhos quentes para finalidade de spa. Com isso, o intervalo adotado nos cálculos foi o de 25°C – 30°C, já que iremos aquecer a água da temperatura ambiente até uma que é comum a todos os materiais consultados, onde esse 30°C se apresenta como uma temperatura limite máxima para tal tipo de piscina. Nesse sentido, calcula-se o valor aproximado de 1800 kWh/mês para essa aplicação, que é somado com a demanda de energia para os banhos, dimensionando assim a economia de energia com o benefício fornecido pelo investimento dessa parte térmica dos sistemas.

4.2.1 Sistemas Convencionais

Desse modo, vê-se que os coletores térmicos mais comuns encontrados em Recife são os com 1.60 m² de área e com um reservatório de água quente de 200 litros, sendo o Aquecedor Solar Soletrol Special Plus escolhido para estudo, 13 desses aquecedores fornecem uma estimativa de produção de energia térmica de 2061,94 kWh/mês para respectiva cidade, formados por tubos de cobre e por uma cobertura de vidro temperado solar com 3.0 mm de espessura. Esses coletores tem seu preço variando entre R\$14.100,00 à R\$17.792,00.

Ademais, é importante realizar as manutenções preventivas para que o equipamento consiga alcançar os 20 anos de tempo de vida prometidos pelo fabricante, que, geralmente ocorre uma vez por ano. Atualmente, segundo pesquisas no mercado solar, essas manutenções preventivas tem um custo médio de R\$150,00 para esse tipo de aquecedor solar, estimando ao longo dos anos, para essa vida útil, um valor total de R\$3.000,00. Vale salientar que não está sendo considerado a desvalorização da moeda ou eventuais mudanças desses preços médios e/ou trocas inesperadas de qualquer componente que seja.

Igualmente, para os painéis fotovoltaicos, temos que os mais frequentes que foram encontrados nas empresas consultadas, são os módulos de silício monocristalino da Canadian Solar CS6W-530MB-AG com 530 W de potência. Com isso, como cada painel gera em média 84,77 kWh/mês para Recife-PE, se for tomado como modelo de estudo um sistema com 8 painéis, teremos 678,17 kWh/mês de energia inicialmente gerada, em média, e com uma área requerida de 20,55 m².

Logo, vê-se que é um valor interessante para análise, já que, segundo uma pesquisa por amostragem, elaborada pelo PROCEL/Eletrobrás em 5625 residências, distribuídas em 18 Estados e o Distrito Federal, no ano de 2005, abrangendo 85,5% do território nacional, onde observa-se que em uma residência com 3 pessoas, há um consumo de energia elétrica de 456,60 kWh/mês, aproximadamente, validando, assim, que esses módulos possuem capacidade de suprir essa demanda por energia elétrica. Porém, vale lembrar que esse consumo publicado pela pesquisa varia bastante, dependendo da região, estação do ano e outros fatores que podem levar esse valor para algo bem mais acima.

Esse sistema fotovoltaico tem seu preço variando, dentre as empresas consultadas, entre R\$18.800,00 à R\$23.200,00. Com relação aos custos de operação, temos que essa tecnologia não necessita de manutenção preventiva, apenas de limpezas de poeira nos painéis, onde geralmente já são realizadas pelas chuvas. Com isso, é necessário, de tempos em tempos, apenas o monitoramento e verificação das fiações, inversores do sistema e do medidor de produção. Ademais, após 12 anos, praticamente na metade de sua vida útil (25 anos), é

necessário a troca do inversor, que custa em média por volta dos R\$2.800,00, para esse modelo do sistema tomado como exemplo.

Posto isso, percebe-se que na capital pernambucana já há uma variedade de empreendimentos que fornecem esses equipamentos solares convencionais, onde a tabela 3 a seguir, representa esse levantamento de forma mais resumida.

Tabela 3. Levantamento dos custos de instalação de módulos fotovoltaicos e coletores térmicos em diferentes empresas do mercado(Consulta em 2022).

Empresa\Custos	Custo sistema fotovoltaico (530-540Wp)	Custo sistema térmico (200 litros)
Americanas	-	R\$ 14.735,45
Amigo Sol	R\$ 18.990,00	-
Green Power E. Solar	R\$ 21.760,83	-
Hidraushop	-	R\$ 14.190,00
Magalu	-	R\$ 14.471,99
Magnus Energia Solar	R\$ 23.104,65	-
Solar thermic	-	R\$ 17.710,90
Sollar engenharia eletrica	R\$ 18.838,50	-
Sun Brasil Energia Solar	R\$ 21.690,00	-
Sunlight	R\$ 22.594,00	-
Via Energy	R\$ 18.935,61	-

4.2.2 Sistema Híbrido PVT

Já para os coletores híbridos PVT, vê-se que por ser algo muito recente e ainda em processo de desenvolvimento, onde há um crescente aumento na quantidade de pesquisas e estudos sobre eles atualmente, acaba sendo difícil de obter os preços e opções de mercado para esse equipamento.

Com isso, foi preciso pesquisar painéis PVT fora do Brasil, que já começaram a ser comercializados. Dessa forma, tem-se que o valor de investimento inicial para essa tecnologia já seria bem maior que as convencionais, já que, pela importação, esse custo tende aumentar ainda mais pelos impostos de importação, fretes e a taxa de câmbio do real para o euro, que nesse caso, para a data de 04/08/2022 teve uma média de venda de R\$ 5,39. Com relação aos impostos, segundo Ricardo Casarin, repórter de economia e negócios, a alíquota do imposto de importação para painéis solares (NCM 8541.40.32) foi reduzida de 12% para 6% no ano de 2022.

Logo, o preço para adquirir esse sistema gira em torno dos R\$ 103.277,73, isso sem considerar os custos com transporte (frete). Onde, para o estudo desse trabalho, foi tomado um sistema com 20,64 m² de área e 4,125kWp, composto por 11 coletores DualSun Spring Hybrid (375 W de potência), fabricados pela empresa Dualsun da França, em que se estima uma

produção mensal inicial de 661,30 kWh/mês de energia elétrica, para Recife-PE, gerada pelo efeito fotovoltaico e 2053,35 kWh/mês de energia térmica.

Com relação à manutenção dos módulos híbridos, temos que, por serem na parte frontal fotovoltaicos e na face traseira térmico, temos particularidades das duas tecnologias. Com isso, para a parte fotovoltaica, vê-se que também não se tem necessidade de nenhuma manutenção técnica preventiva, onde os custos são idênticos ao convencional, sendo necessário apenas a troca dos inversores na metade da vida útil (25 anos) do sistema híbrido. Vale ressaltar que não é necessário ser o mesmo microinversor importado, basta ser um condizente com as especificações técnicas do sistema, podendo ser adquirido no mercado brasileiro mesmo. Dessa forma, podemos representar esse custo girando em torno também dos R\$ 2.800,00 que é visto no convencional.

Já a parte térmica, também há uma grande semelhança com os aquecedores, mas com uma vantagem, não há um sobreaquecimento elevado, logo, o fluido de transferência de calor, assim como os elementos do painel, são preservados por mais tempo.

Sendo assim, é de extrema confiabilidade que as despesas com manutenções dos equipamentos híbridos, como um todo, tendem a ser menores que os convencionais simultâneos, já que as chances de defeito em muitos componentes por sobreaquecimentos são bem menores, além de que, se é cobrado o mesmo valor anual de R\$ 150,00 para verificação de todo equipamento, onde se considerado os 25 anos de vida útil, se tem um valor de R\$ 3.750,00. Dessa maneira, vê-se que há uma despesa total ao longo de toda vida útil do sistema com manutenções e trocas de componentes de R\$ 6.550,00, sendo R\$ 2.800,00 dos inversores e R\$ 3.750,00 com a mão de obra das empresas solares que prestam tais serviços.

É importante saber que esses valores ditos nessa seção variam bastante de acordo com cada empresa e equipamento, podendo até ter contratos de instalação já com todas as manutenções inclusas no valor inicial. Com isso, deve-se sempre procurar informações detalhadas, com cada empresa disponível, sobre tudo que envolve a adesão dessas tecnologias antes mesmo de fechar qualquer negócio ou de calcular qualquer tipo de custo ou lucro.

Dessa forma, vê-se que não é interessante tomar todos os cálculos e levantamentos de custos como um padrão para todos os casos e contextos do mercado de energia solar, já que essa padronização de estrutura de custos e ganhos feita aqui, são necessárias e implantadas para todas as três tecnologias, para facilitar a comparação desses equipamentos em questão, com o objetivo de se aproximar ao máximo da realidade atual e facilitar no entendimento das diferenças.

4.3. Cálculos e Comparações Econômicas

Para realizar as comparações necessárias, é preciso calcular primeiro o quanto cada sistema oferece de custos e ganhos, levando em consideração as perdas de eficiência por ano que cada tecnologia sofre, assim como todas as manutenções previstas com seus respectivos gastos, citados na subseção anterior, ao longo da vida útil de cada um. Dessa forma, todos os cálculos realizados através das equações que serão apresentadas nessa subseção, foram desenvolvidos no programa Microsoft Excel, além disso, serão aproveitados os seus respectivos resultados para a criação, também no Excel, das tabelas expostas nos resultados.

Segundo o Portal Solar, de maneira geral, já que cada equipamento terá suas especificações mais particulares, podemos definir que em média cada geração fotovoltaica há uma perda no primeiro ano de 3%, tendo os anos seguintes uma diminuição de 0,7% na eficiência da sua geração. Para a geração térmica, pode-se considerar uma perda próxima a zero, não ocorrendo alterações notáveis ao longo de sua vida útil. Vale salientar que essa degradação anual de eficiência varia de acordo com cada fabricante e modelo, mas para normalizar os cálculos, serão utilizados esses valores para todos.

Dessa maneira, vê-se que a expressão geral que melhor representa os custos para cada equipamento é:

$$D_t = i_i + D_m \quad (2)$$

Onde, D_t é a Despesa Total, i_i o investimento inicial e D_m as Despesas com as manutenções/substituições de componentes ao longo da vida útil. Ademais, temos que para os cálculos dos ganhos com as gerações, onde têm-se a Equação 3 a seguir:

$$G_t = \left(\sum_{i=1}^V P_{ea} \cdot e_i \right) \cdot 0,7358 \quad (3)$$

Onde,

i – Ano

V – Totais de anos (Vida útil)

Sendo assim, G_t , que é o Ganho Total, em reais, calculado por meio de um produto entre P_{ea} , que representa a produção anual estimada de energia em kWh, e e_i , que corresponde a eficiência de geração de energia do respectivo ano de tempo de funcionamento do equipamento, tendo os seus valores explicitados no início dessa subseção. É utilizado v para representar o tempo de vida útil do equipamento, que limita o somatório dos produtos, fazendo com que seja incluído apenas o que é produzido no tempo de vida útil garantido pelo fabricante. Por fim, é feito um produto final entre o total de produção de energia ao longo de toda vida, com o preço que é

cobrado pela companhia de energia elétrica, que nesse caso é de R\$ 0,7358/kWh, também visto em seções anteriores.

Ademais, também pode-se calcular o Lucro Líquido Total (L_t) com essa implantação de tecnologia em tal residência, que é nada mais que o quanto realmente o investidor lucrou, com todos os custos já descontados. Pela subtração entre Ganho Total (G_t) e o Despesa Total (D_t) se tem:

$$L_t = G_t - D_t \quad (4)$$

Para melhor dimensionamento e/ou entendimento do lucro ao adquirir um determinado equipamento solar, também pode-se dividir esse Lucro Líquido Total pela quantidade de meses que possui a vida útil dele, onde terá uma média do Lucro Líquido Mensal.

4.4. Período de Recuperação do Investimento (Retorno)

Um ponto muito importante a ser analisado, é o “payback” de cada uma das tecnologias. Sendo, simplesmente o tempo que é necessário para ter o retorno, em reais, de todo o investimento feito em uma determinada instalação solar como essa. Dessa forma, para ter um valor mais realista ainda, é possível calcular o valor do payback descontado, que é nada mais nada menos, que o retorno de investimento levando em consideração mais alguns fatores, como por exemplo, a taxa de juros com o passar dos anos, taxa de atratividade mínima e até mesmo desvalorização da moeda. Existe muitos outros fatores que podem influenciar nesse payback, mas varia de acordo com o tipo de investimento e empresa, mas no caso deste estudo, é levado em consideração as taxas de juros.

Para esse cálculo, primeiro deve-se extrair o valor obtido na produção de energia durante o período de um ano. Como há uma variação dessa produção para o caso dos painéis fotovoltaicos, é utilizado, para todos, uma média de Ganho Anual, sendo extraída do G_t .

$$G_a = \frac{G_t}{V} \quad (5)$$

Sendo, G_a o Ganho Médio Anual de um dado equipamento, que é o quociente da divisão entre o Ganho Total e a Vida Útil. Onde, podemos utilizá-lo como nosso Valor de Fluxo de Caixa Presente, que é importante para a próxima etapa do cálculo do *payback* descontado.

Com isso, como foi citado anteriormente, nos investimentos é muito comum levar em consideração as taxas para alguns cálculos, na maioria das vezes, tomando os juros baseados

na taxa Selic, para definir uma rentabilidade mínima esperada. Sendo assim, para o cálculo do Valor Presente Líquido, que é o real valor de ganho com o passar do tempo com a influência das taxas, é:

$$V_{PL} = \frac{G_a}{(1+TMA)^n} \quad (6)$$

Onde o V_{PL} indicando o Valor Presente Líquido, TMA a Taxa Mínima de Atratividade, G_a o Valor de Fluxo de Caixa Presente e n o período ou ano em questão.

O *payback* descontado pode ser representado em qualquer unidade de tempo, mas, no caso dos sistemas solares, visualizar esse valor em meses ou anos, é mais interessante para todo entendimento do trabalho, onde no caso desse estudo, está sendo visto por ano. Dessa forma, temos que o cálculo matemático que melhor representa o *payback*:

$$P_b = \frac{i_i}{V_{PL}} \quad (7)$$

Sendo, P_b , a incógnita que indica o *payback* descontado em anos, i_i o investimento inicial com adesão e instalação, em reais, e V_{PL} o Valor presente líquido, também em reais, com a produção de energia.

5. Resultados

Sendo assim, após realizar todos os cálculos necessários citados na seção anterior, pôde-se observar os valores obtidos e, assim, executar as devidas análises e comparações. Ademais, vê-se que, pelo fato de os coletores híbridos serem encontrados apenas no exterior, é mais um indicativo para ser levado em consideração nas comparações entre os modelos de tecnologia solar.

Com isso, se as análises energéticas e econômicas forem positivas para o coletor híbrido, pode-se dizer que ele já é uma boa opção para o padrão de residência apresentada nesse estudo. Dessa forma, para organizar e recapitular algumas informações importantes citadas em seções anteriores, tem-se a Tabela 4 abaixo, que representa os valores estimados de custos e de geração inicial para cada tipo de equipamento.

Tabela 4. Especificações e custos iniciais com cada sistema solar (Ano 2022).

	Coletor Térmico	Módulo Fotovoltaico	Térmico e Fotovoltaico simultâneos		Coletor Híbrido PVT	
Área (m²)	20,80	20,55	41,35		20,64	
Vida útil (anos)	20	25	25		25	
Investimento Inicial	R\$ 14.190,00	R\$ 18.838,50	R\$ 33.028,50		R\$ 103.277,73	
Despesas com manutenções	R\$ 3.000,00	R\$ 2.800,00	R\$ 5.800,00		R\$ 6.550,00	
Despesas totais	R\$ 17.190,00	R\$ 21.638,50	R\$ 38.828,50		R\$ 109.827,73	
Estimativa de geração de energia inicial (kWh/mês)	2061,94 (Energia térmica)	678,17 (Energia elétrica)	678,17 (Energia elétrica)	2061,94 (Energia térmica)	661,30 (Energia elétrica)	2053,35 (Energia térmica)

Por meio da Tabela 4, vê-se que realmente o sistema PVT necessita de menos área para sua instalação e que sua estimativa de geração energia inicial é um pouco menor do que a do outro sistema simultâneo. Isso por alguns fatores, como, por exemplo, eficiências um pouco menor para esse caso, já que são modelos diferentes de fabricantes diferentes. Ainda, as áreas que são diferentes entre os componentes dos respectivos sistemas, causando, assim, essa discreta diferença na geração, o que é comum e esperado nesse contexto apresentado.

Ademais, percebe-se que é importante a análise das gerações de energia ao longo de cada ano de sua vida útil, já que, com o passar do tempo, é normal em todo equipamento haver uma certa redução na sua eficiência, como comentado no início da seção 4.3. Sendo assim, temos que essa degradação anual de eficiência ocorre apenas para as conversões de energia nas células fotovoltaicas, logo, vê-se que o coletor térmico e a parte térmica do PVT não necessitam o cálculo de geração para cada ano, por sempre permanecer o mesmo valor.

Dessa maneira, é importante a representação dos valores obtidos da geração em kWh, com a degradação anual de eficiência, mostrada na Tabela 5 esses resultados.

Tabela 5. Estimativa da geração de energia, em kWh, por ano.

ano\sistema	Coletor Térmico (kWh)	Módulo Fotovoltaico (kWh)	Térmico e Fotovoltaico simultâneos (kWh)	Coletor Híbrido PVT (kWh)
Ano 1	23.706,72	8.138,04	31.844,76	31.642,39
Ano 2	23.706,72	7.893,90	31.600,62	31.404,32
Ano 3	23.706,72	7.601,82	31.308,54	31.348,77
Ano 4	23.706,72	7.546,57	31.253,29	31.293,22
Ano 5	23.706,72	7.491,31	31.198,03	31.237,67
Ano 6	23.706,72	7.436,05	31.142,77	31.182,12
Ano 7	23.706,72	7.380,80	31.087,52	31.126,57
Ano 8	23.706,72	7.325,54	31.032,26	31.071,02
Ano 9	23.706,72	7.270,28	30.977,00	31.015,47
Ano 10	23.706,72	7.215,02	30.921,74	30.959,92
Ano 11	23.706,72	7.159,77	30.866,49	30.904,37
Ano 12	23.706,72	7.104,51	30.811,23	30.848,82
Ano 13	23.706,72	7.049,25	30.755,97	30.793,27
Ano 14	23.706,72	6.993,99	30.700,71	30.737,72
Ano 15	23.706,72	6.938,74	30.645,46	30.682,17
Ano 16	23.706,72	6.883,48	30.590,20	30.626,62
Ano 17	23.706,72	6.828,22	30.534,94	30.571,07
Ano 18	23.706,72	6.772,97	30.479,69	30.515,52
Ano 19	23.706,72	6.717,71	30.424,43	30.459,97
Ano 20	23.706,72	6.662,45	30.369,17	30.404,42
Ano 21	0,00	6.607,19	6.607,19	30.348,87
Ano 22	0,00	6.551,94	6.551,94	30.293,32
Ano 23	0,00	6.496,68	6.496,68	30.237,77
Ano 24	0,00	6.441,42	6.441,42	30.182,22
Ano 25	0,00	6.386,16	6.386,16	30.126,67
Estimativa de geração total	474.134,40	176.893,81	651.028,21	770.014,29

Vale salientar que, na Tabela 5, a parte dos valores de produção de energia térmica dos sistemas em análise, é referente a quantidade de energia que seria gasta nos banhos e no aquecimento da piscina da residência, caso não utilizasse o aquecedor solar e sim uma resistência elétrica e aquecedor elétrico, por exemplo. Não podendo ser confundido com a quantidade de energia térmica que os sistemas podem proporcionar em sua máxima extração.

Desse modo, observa-se que para fazer uma comparação econômica é preciso calcular o valor gerado, considerando a cotação de 0,7358 R\$/kWh tabelada pela Neoenergia em Pernambuco, preço esse que foi citado anteriormente nesse estudo. Com isso, temos a Tabela 6, que representa o ganho em reais com a geração de cada sistema solar.

Tabela 6. Ganhos com a produção de energia em reais.

	Coletor Térmico	Módulo Fotovoltaico	Térmico e Fotovoltaico simultâneos	Coletor Híbrido PVT
Ganho Médio Anual	R\$ 17.443,40	R\$ 5.206,34	R\$ 19.161,06	R\$ 22.663,06
Ganho Total	R\$ 348.868,09	R\$ 130.158,46	R\$ 479.026,56	R\$ 566.576,52

Além do estado de Pernambuco, também pode-se calcular esses valores para outros estados, fazendo apenas a multiplicação da quantidade de energia gerada, considerando os diferentes níveis de irradiação solar que corresponde a cada local, pela cotação do preço da energia nas outras respectivas concedentes dos outros estados do Brasil. Temos como exemplo a Tabela 7 abaixo, que representa alguns desses resultados para os estados do Amazonas (AM), Goiás (GO), São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ) e Santa Catarina (SC).

Tabela 7. Ganho total no fim da produção de energia, em reais, para diferentes estados.

Estado	Cotação (R\$/kWh)	Coletor Térmico	Módulo Fotovoltaico	Térmico e Fotovoltaico simultâneos	Coletor Híbrido PVT
RJ	0,9683	R\$ 459.080,63	R\$ 151.713,07	R\$ 610.793,71	R\$ 725.950,89
PE	0,7358	R\$ 348.868,09	R\$ 130.158,46	R\$ 479.026,56	R\$ 566.576,52
AM	0,6930	R\$ 328.575,14	R\$ 99.172,52	R\$ 427.747,66	R\$ 510.144,44
SP	0,6565	R\$ 311.264,49	R\$ 96.774,85	R\$ 408.039,34	R\$ 486.102,34
SC	0,6558	R\$ 310.913,63	R\$ 92.321,23	R\$ 403.234,86	R\$ 481.198,79
GO	0,6369	R\$ 301.976,20	R\$ 110.976,58	R\$ 412.952,78	R\$ 488.729,94

Para essa Tabela 7, observa-se facilmente que em um investimento de energia solar, os estados em que se têm preços mais elevados de energia, conseqüentemente, há uma grande chance de sua receita bruta final ser maior, já que o investidor estará produzindo energia que é ainda mais caro que a mesma em Pernambuco. Mas, não é uma regra, já que como pode-se observar no estado do Goiás, por mais que tenha a energia mais barata dentre os que estão listados, ainda se tem o terceiro melhor retorno, justificado pela influência da irradiação solar (segunda maior, ficando atrás apenas da irradiação solar em Pernambuco) que lhe faz ter essa vantagem a mais com relação aos outros estados, tornando, dessa forma, a adesão desses equipamentos ainda mais atrativa para estados onde o preço de energia é cada vez mais exacerbado ou estados que tenham boas quantidades de irradiação solar.

Sendo assim, após os cálculos de ganhos, é preciso apenas subtrair o valor gerado do valor gasto, obtendo, dessa forma, o lucro por adquirir cada sistema solar. Ademais, é possível realizar algumas manipulações matemáticas para ter uma visualização diferente desses parâmetros, como, por exemplo, dividir o Lucro Líquido Total pela quantidade de meses de vida útil, para assim, alcançar o Lucro Líquido Médio Mensal, onde proporciona o valor que você estará “rendendo” por mês a longo prazo.

Além do Lucro Líquido, como mencionado, há o *payback* descontado de cada investimento, parâmetro esse que indica quanto tempo leva para o investidor alcançar o mesmo valor investido inicialmente, por meio das gerações de energia fornecidas pelo sistema solar. Tomando como base para os cálculos a taxa Selic de 13,75% ao ano, do último dia 03 de agosto de 2022, sendo a mais recente com relação ao dia da elaboração desse cálculo, de acordo com

o Banco Central do Brasil. Com isso, vê-se que a Tabela 8 a seguir, representa essas quantias, em reais, de lucros e que também é seguido dos *paybacks*, em anos, para os equipamentos em questão.

Tabela 8. Lucros líquidos e *payback* das tecnologias solares.

	Coletor Térmico	Módulo Fotovoltaico	Térmico e Fotovoltaico simultâneos	Coletor Híbrido PVT
Lucro Líquido Médio Mensal	R\$ 1.381,99	R\$ 361,73	R\$ 1.467,33	R\$ 1.522,50
Lucro Líquido Total	R\$ 331.678,09	R\$ 108.519,96	R\$ 440.198,06	R\$ 456.748,79
Payback (Anos)	1,14	5,74	2,01	8,27

Em suma, vê-se que pelo fato do coletor híbrido PVT ser importado e sofrer um brusco aumento de seu preço e custos por conta do câmbio das moedas, impostos e até transporte, essa tecnologia acaba possuindo um valor de lucro muito menor se comparado com o outro sistema simultâneo. Além disso, seu *payback* também se estende por essa influência do custo de investimento inicial, tornando-se economicamente inviável pela grande diferença de valores.

Ademais, deve ser enfatizado novamente que os lucros e *paybacks* poderiam ser ainda melhores, caso fosse considerado mais aplicações, buscando aproveitar ao máximo toda capacidade disponível. Pois, foi visto que ainda sobra inicialmente quase 100 kWh/mês de energia térmica, para nosso caso de estudo em Recife. Por exemplo, seria possível utilizar o restante do potencial de geração térmica desses sistemas com um discreto aumento na demanda de banhos.

Porém, é importante analisar alguns pontos, por exemplo, nota-se que o sistema simultâneo requer uma área aproximadamente 2 vezes maior para seu funcionamento. Ademais, por mais que o equipamento híbrido possua um preço para sua adesão de aproximadamente 182,85% a mais que o sistema convencional simultâneo, nota-se que no final de suas respectivas vidas úteis, terão rendimentos bem parecidos com relação aos lucros. Também, vê-se que o simultâneo gera cerca de 50,23% a menos de energia por área, reforçando um dos principais pontos positivos citados já nesse trabalho do sistema híbrido PVT.

Com isso, observa-se que os coletores híbridos PVT possuem um grande potencial para diversas aplicações, até mais que o sistema convencional simultâneo, mas é preciso que esses equipamentos cheguem ao Brasil para serem nacionalmente comercializados, com um preço sem os impactos de uma importação. Desse modo, as empresas pernambucanas ao ter acesso a este tipo de sistema, poderá introduzir a realidade dos recifenses.

6. Conclusões e Perspectivas

Conclui-se que as tecnologias solares estão cada vez mais ganhando espaço em pesquisas, artigos e também no mercado de energia, oferecendo hoje um certo leque de opções de equipamentos interessantes para diversas aplicações. Ademais, somado a um mundo onde a sustentabilidade é uma das prioridades e também um dos desafios da sociedade, vemos que a energia solar fotovoltaica, assim como a térmica, são boas rotas nesse primeiro passo a um futuro mais renovável e sustentável.

Dessa forma, percebe-se que esse trabalho teve o objetivo de comparar os coletores PVT, dos convencionais simultâneos que são mais populares, levando em consideração não só as diferenças energéticas, mas trazendo à tona, também, as divergências econômicas.

Dessa maneira, é observado que para cidade de Recife-PE, têm-se uma disponibilidade muito maior de empresas, equipamentos, preços e cotações para as tecnologias mais convencionais do ramo solar, sendo muito difícil, e praticamente inexistente, a possibilidade de adesão de um sistema de módulos PVT pelo território estadual.

Consequentemente, percebe-se que os coletores PVT são realmente muito mais custosos, porém, é inegável que possuem um potencial muito grande para se desenvolver e se aprimorar com o tempo, onde poderá ser também mais acessível. Isso porquê vê-se que ele apresenta muitos pontos positivos, como uma tendência a ter eficiência elétrica maior, um menor tempo de *payback* (menos para um contexto de importação) e por mais que a eficiência térmica seja geralmente menor comparada com a do coletor plano, mesmo assim, ela se mantém em um valor aceitável para utilização da água aquecida por esse coletor híbrido.

Ademais, foi também visto que ele produz uma maior quantidade de energia por área, já que necessita de menos espaço comparado as outras tecnologias utilizadas simultaneamente, além de que, também possui menor custo de fabricação. Porém, também é nítido o quão mais caro você precisa pagar por tudo isso, sendo uma das principais razões pelas quais não se vê muito coletor híbrido PVT pelas residências ao redor do mundo e principalmente no Brasil. Além disso, é somado ao fato de que as pesquisas e estudos, sobre essa tecnologia híbrida, ainda se mostram em seus momentos iniciais, causando uma baixíssima disponibilidade desse tipo de equipamento no mercado solar.

Além disso, também temos que os coletores híbridos são reféns de uma proporção entre demanda elétrica e térmica específica, já que sempre ao aumentar ou reduzir uma dessas capacidades de geração, também irá afetar a outra no mesmo sentido, por estarem sempre juntas no mesmo equipamento. Logo, caso haja uma diferença maior entre as necessidades dessas energias, não é possível instalar um sistema híbrido sem que haja um super

dimensionamento. Já o sistema simultâneo consegue ter essa flexibilidade, onde conseguimos por exemplo montar um agrupamento de módulos fotovoltaicos que consiga fornecer uma quantidade de energia elétrica muito grande, e mesmo se a demanda por geração térmica seja bem menor, também é possível, isso apenas implantando poucos coletores para atender essa demanda aproximada.

Dessa forma, para o uso não só das residências brasileiras de 3 pessoas, com todos os padrões e médias de consumos que foram levados em consideração, mas assim como também para outros cenários semelhantes, vê-se que os coletores híbridos ainda não são viáveis para investimentos. Isso se dá principalmente pelo fato de a importação ser o único meio para obtê-lo, somado também ao seu preço que ainda não foi reduzido, pois ainda possui baixa escala de produção.

Nesse sentido, por conta de existir atualmente uma burocracia maior para o PVT, nota-se que comparado com o uso simultâneo dos dois sistemas solares convencionais, não há uma compensação suficiente dos pontos positivos citados anteriormente para sobrepor essa disparidade de valores e outras desvantagens.

Em suma, o coletor híbrido PVT acabou sendo muito prejudicado na comparação feita nesse estudo, já que foi encontrado apenas no exterior, onde há muitos fatores que impactam em seus custos, fatores esses que não influenciam mais os custos dos sistemas convencionais. Sendo assim, não é justo tal comparação econômica, entretanto, é possível por meio dela enxergar os pontos positivos e negativos dos equipamentos, mostrando, assim, que se houver um bom investimento nos sistemas híbridos, ao chegarem ao Brasil, e consequentemente terem os seus valores reduzidos e mais próximos dos convencionais, mesmo que ele ainda permaneça um pouco mais custoso, ele começará a ser mais viável e se tornará bem mais rentável.

Assim, essa tecnologia híbrida ainda possui uma estrada a trilhar para conquistar os telhados das residências brasileiras, dependendo um pouco de mais investimentos e pesquisas, visando a redução de custos e maior eficiência para, só assim, se tornar mais viável e também uma opção de geração solar, ao lado das tecnologias convencionais que já possuem seus espaços no mercado.

Por fim, observa-se que mesmo os equipamentos solares estando ainda em processo de lapidação, especialmente os híbridos, sobretudo no Brasil, aos poucos vemos que há um bom desenvolvimento de todo ramo, sendo já expressivos no exterior. Portanto, podemos esperar para os próximos anos, que esse anseio pela autossustentabilidade da humanidade, irá continuar movendo esses avanços nas pesquisas e criações de novas tecnologias, não só na área da energia solar, mas assim como nas outras energias renováveis.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me proporcionado a oportunidade de não só entrar na Universidade Federal de Pernambuco, mas também por ter me dado forças para chegar até o fim de minha graduação.

Agradeço ao meu orientador, André Felipe Vieira da Cunha, que foi super presente em todo o desenvolvimento deste trabalho, compartilhando conhecimento, pela paciência, por toda confiança e pelo suporte fornecido, quando necessário. Aos meus colegas de graduação que garantiram anos mais leves e pelas diversas ajudas prestadas.

Aos meus pais, Manoel Aldo da Silva e Ana Paula Alves e Silva, e minha irmã, por estarem comigo em todos os momentos dessa jornada.

Agradecimento especial para minha tia, Ana Patricia Alves e Silva, que me deu um suporte importantíssimo em um dos meus momentos mais difíceis.

Agradeço a todos que compõe a Universidade Federal de Pernambuco, docentes, técnicos e funcionários por tudo que vocês fazem por aqueles que passam por essa instituição, e pela mesma, contribuindo assim, para que ela seja uma das melhores de nosso país.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Banco de Informações de Geração BIG**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 05 abr. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2022.

ALMEIDA, Laura Manuela Melo Carvalho Esteves de. **Estudo de um Coletor Solar Híbrido para Produção de Eletricidade e Calor**. Universidade do Porto. Portugal, 2008. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/60476/1/000137538.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2022.

ANCINES, C. **Comparação entre o Desempenho de um Coletor Híbrido Térmico Fotovoltaico com o de um Coletor Plano e um Módulo Fotovoltaico Convencional**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/149352>>. Acesso em: 20 abr. 2022.

Banco Central do Brasil. **Taxa de juros básicas – Histórico**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>>. Acesso em: 16 set. 2022.

BERGENE, T.; LØVVIK, O. M. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. **Solar Energy**, v. 55, n. 6, p. 453–462, dez. 1995.

BILHALVA, Edison Estivalet Junior. **Análise comparativa entre módulos FV padrão e híbrido tipo PVT**. Porto Alegre, 2018. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/195674/001094197.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 04 jun. 2022.

CASARIN, RICARDO. **Governo reduz imposto de importação para painéis solares e baterias de lítio**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/politica/executivo/governo-reduz-imposto-de-importacao-para-paineis-solares-e-baterias-de-litio>>. Acesso em: 05 ago. 2022.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SANTA CATARINA S.A. **Tarifas e taxas de energia: tarifa branca (sem tributos)**. Santa Catarina, 2022. Disponível em: <<https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia>>. Acesso em: 16 set. 2022.

CHOW, T. T.; HE, W.; JI, J. Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application. **Solar Energy**, v. 80, n. 3, p. 298–306, mar. 2006.

CHOW, T. T. Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. **Solar Energy**, v. 75, n. 2, p. 143–152, ago. 2003.

COELHO, D. **IDENTIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS CRÍTICAS E SIMULAÇÃO DO USO DE COLETORES SOLARES EM PRÉDIOS RESIDENCIAIS**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Daniel_Moreira_Coelho.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2022.

CRESESB - Centro de Referência Para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. Manual para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2022.

CRESESB - Centro de Referência Para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. Potencial Solar - SunData v 3.0. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 30 set. 2022.

DEMAE – DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO DE CALDAS NOVAS. **Consumo de água**. Caldas Novas, 2022. Disponível em: <<https://www.demae.go.gov.br/projetos/consumo-de-agua/>>. Acesso em: 22 jun. 2022.

ELBREKI, A. M. et al. The role of climatic-design-operational parameters on combined PV/T collector performance: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 602–647, maio 2016.

ELETRORÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S. A., PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Pesquisa de Posse de equipamentos e Hábitos de Uso - Ano base 2005 – Casse Residencial – Relatório Brasil**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0%2D06D1%2D4FFE%2DB335%2D95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7BE6AA7196%2DE64E%2D4FC0%2D9567%2D994B77FB24DE%7D%3B&UIPartUID=%7B05734935%2D6950%2D4E3F%2DA182%2D629352E9EB18%7D>>. Acesso em: 10 abr. 2022.

ENEL S.P.A. **Tarifas Aplicadas e Valores de Serviços Cobráveis**. Goiás, 2021. Disponível em: <<https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/megamenu/taxas,-tarifas-e-impostos/cartaz-tarifas-2021.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2022.

ENEL S.P.A . **Tarifas RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA N° 3.015, DE 15 DE MARÇO DE 2022, com vigência de 15 de março de 2022 a 14 março de 2023.** Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/one-hub-brasil---2018/tarifas-taxas-impostos/rio/Tarifa%20enel%20Rio_Julho%202022.pdf>. Acesso em: 16 set. 2022.

ENEL S.P.A. **TARIFAS PARA O FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA N° 3.053/2022 DA ANEEL.** São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Para_Voce/tarifa-energia-eletrica.html>. Acesso em: 16 set. 2022.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica.** 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdnenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 22 mai. 2022.

FLORSCHUETZ, L. W. Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. **Solar Energy**, v. 22, n. 4, p. 361–366, 1979.

Governo Federal do Brasil. **Qual é a temperatura ideal para o banho ?**. Gov.br, Ministério da Educação, 2017. Disponível em: <<https://www.gov.br/ebserh/pt-br/hospitais-universitarios/regiao-centro-oeste/hc-ufg/comunicacao/noticias/qual-e-a-temperatura-ideal-para-o-banho>>. Acesso em: 01 out. 2022.

GUERRA, M. I. DA S. **Análise do desempenho elétrico de um gerador fotovoltaico com o auxílio da tecnologia PVT.** João Pessoa, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/11644>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2010.** Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/23/47427>>. Acesso em: 22 jun. 2022.

IBRAHIM, A. et al. Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 352–365, jan. 2011.

KALOGIROU, S. A.; TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 18-19, p. 3368–3382, nov. 2006.

KHANDELWAL, S.; REDDY, K. S.; MURTHY, S. S. Performance of contact and non-contact type hybrid photovoltaic-thermal (PV-T) collectors. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 2, n. 4, p. 359–375, 1 out. 2007.

MARQUES, R. L. M. R. P. **Avaliação da viabilidade de coletores híbridos fotovoltaicos e térmicos para aplicação ao aquecimento de águas e micro-geração de eletricidade**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10216/59711>>. Acesso em: 12 jun. 2022.

MIRANDA, M. O. L. E. **Análise do Desempenho de um Coletor Solar Híbrido em um Sistema de Produção Simultânea de Eletricidade e Água Quente**. Universidade Federal de Ouro Preto, 2021. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/3085>>. Acesso em: 18 mai. 2022.

NACIONAL, I. **LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022 - DOU - Imprensa Nacional**. Disponível em: <<https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>>. Acesso em: 20 out. 2022.

NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. Lavras, 2004. Disponível em: <https://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2022.

OLIVEIRA, Arthur Vieira de; FRATESCHI, Newton Cesário. **Sistema híbrido de aquecimento solar de água e geração fotovoltaica com melhor aproveitamento da energia solar**. Universidade Estadual de Campinas, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/84943?locale=pt_BR>. Acesso em: 29 mai. 2022.

PEREIRA, E., et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <<http://doi.org/10.34024/978851700089>>. Acesso em: 04 abr. 2022.

PINHO, J. T., Galdino, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL-CRESESB, Rio de Janeiro, 2014. 528 p. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2022.

Portal de Serviços da Neoenergia Pernambuco. **Tarifas Grupo B**. 2022. Disponível em: <<https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Pages/Baixa%20Tens%C3%A3o/tarifas-grupo-b.aspx>>. Acesso em: 22 jun. 2022.

PORTAL SOLAR. **Quanto tempo dura os painéis solares ?**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/quanto-tempo-duram-os-paineis-solares>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

RIBEIRO, Nadja C. C. **Análise de Sistema Híbrido Solar: Fotovoltaico e Térmico**. Brasília, 2016. Disponível em: < https://bdm.unb.br/bitstream/10483/20032/1/2016_NadjaCardosoCRibeiro_tcc.pdf >. Acesso em: 15 mai. 2022.

SANDNES, B.; REKSTAD, J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. **Solar Energy**, v. 72, n. 1, p. 63–73, jan. 2002.

SATHE, T. M.; DHOBLE, A. S. A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 645–672, set. 2017.

SILVA, J. J. B. DA. **Análise técnica e econômica de um sistema fotovoltaico como fonte de energia para agricultura familiar**. Lavras, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/4557>>. Acesso em: 20 mai. 2022.

Simulador de Consumo | Amazonas Energia S/A. Disponível em: <<https://website.amazonasenergia.com/sua-conta/simulador-de-consumo>>. Acesso em: 16 set. 2022.

SOUSA, Gleison Vieira de; LEITE, Wander Cordeiro. **O bombeamento de água através do uso de energia solar fotovoltaica**. Campo dos Goytacazes, 2013. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/40228182-Gleison-vieira-de-sousa-wander-cordeiro-leite.html>>. Acesso em: 16 mai. 2022.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Yiannis; NOUSIA, Th; SOULIOTIS, Manolis. **TEST RESULTS OF AIR COOLED MODIFIED PV MODULES**. Department Of Physics, University Of Patras, Patra, 2001.

TYAGI, V. V.; KAUSHIK, S. C.; TYAGI, S. K. Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1383–1398, abr. 2012.

VIANA, P. R. **Avaliação experimental de um protótipo de coletor solar híbrido para geração simultânea de água quente e eletricidade**. 2014. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

ZONDAG, H. A. et al. **PVT RoadMap, a European Guide for the Development and Market Introduction of PV-Thermal Technology**. PV Catapult Project, 2005. Disponível em: < <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/rx05170.pdf> >. Acesso em: 16 mai. 2022.

ZONDAG, H. A. et al. The yield of different combined PV-thermal collector designs. **Solar Energy**, v. 74, n. 3, p. 253–269, mar. 2003.