



# **Estudo experimental de um modulo solar híbrido: fotovoltaico, termoelétrico e térmico**

**Ginga Ferraz José Campos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e De Computadores**  
(2º Ciclo de Estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires

**Outubro de 2023**

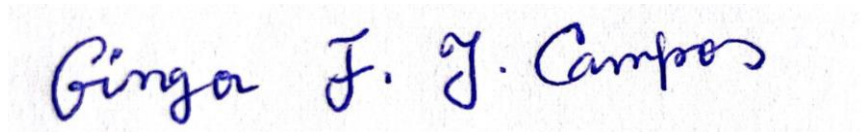


## **Declaração de Integridade**

Eu, Ginga Ferraz José Campos, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição m10953 de/o Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 09 /10/2023

A handwritten signature in blue ink that reads "Ginga F. J. Campos". The signature is written in a cursive style and is centered on a light-colored rectangular background.

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho de dissertação a minha querida Mãe Guilhermina Ferraz que se não fosse por ela não teria a oportunidade de realizar o meu percurso de vida e nem acadêmico.

# Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível graças á contribuição individual de um conjunto alargado de pessoas. Por isso, desejo expressar os meus agradecimentos a aqueles cujo esforço contribuiu de alguma forma para a realização deste trabalho.

Primeiramente quero agradecer a Deus Pai pela vida e por tudo quanto ele proporcionou-me para a realização do meu percurso de vida e académico.

Em segundo lugar gostaria de exprimir a minha gratidão ao meu orientador Professor Doutor Luís Carlos Carvalho Pires, por todos os conhecimentos que me foi transmitido durante o trabalho, compreensão, tempo e ajuda disponibilidade, bem com a confiança depositada em mim, para realização deste trabalho de dissertação.

Também quero agradecer ao senhor João Correia, técnico superior responsável pelo Laboratório de termodinâmica e transmissão de calor, pela ajuda indispensável prestada, disponibilidade e auxílio dispensado durante todo o período da realização da parte experimental. Assim como ao senhor Nuno Santos, técnico de informática e responsável pelo FabLab por toda a sua ajuda dispensada durante a realização dos ensaios.

Aos meus colegas e amigos do curso de Engenharia Eletrotécnica e De Computadores e não só, que estiveram comigo e fizeram deste percurso pela Universidade da Beira Interior uma história inesquecível. Sem esquecer todos os professores e docentes que ao longo do meu percurso académico me transmitiram todos os conhecimentos que hoje possuo.

Por fim, agradeço especialmente a minha querida Mãe Guilhermina Ferraz que é o pilar de todo o meu percurso de vida por me ter proporcionado a oportunidade de realizar tudo quanto poderia. Aos meus irmãos Eduardo Ferraz Campos, Esperança Ferraz Campos, Nginga Ferraz Campos e Morena Ferraz Raimundo que sempre me apoiaram. Aos meus tios Avelino Ferraz Lutendo, Baptista Tito, David Ferraz Lutendo, João Tito e José Carlos bem como aos meus padrinhos Africano Bange e Paula Tito por toda ajuda e todos cuidados demonstrado.

# Resumo

A extração de energia a partir da luz solar é uma forma promissora de resolver a crise energética, as mudanças climáticas bem como a descarbonização. A energia solar tem atraído atenção e ajudado muito na diversificação das fontes de geração de energia, devido as suas características de desenvolvimento de energia limpa e sustentável. Os sistemas solares fotovoltaicos e térmicos são duas tecnologias que permitem a conversão direta da energia solar em energia elétrica e térmica. Neste trabalho de dissertação pretende-se aumentar o rendimento de um painel fotovoltaico, simultaneamente incrementar a potência elétrica com a cogeração de módulos termoelétricos, e fazer uma recuperação térmica do calor dissipado pelo painel fotovoltaico. Este trabalho teve como foco a reconstrução e alterações necessárias de um módulo solar híbrido PV-TEG-T já existente com o objetivo de otimizar o sistema e aumentar a potência gerada, a partir de uma avaliação experimental do módulo. Este módulo consiste em três componentes principais a saber, um módulo fotovoltaico, um módulo termoelétrico e um permutador de calor para o aproveitamento solar térmico. O acoplamento foi feito, colocando o módulo termoelétrico constituído por 16 células de Peltier na parte traseira do painel, e o permutador de calor em contacto com a parte fria do módulo termoelétrico. De modo que o conjunto termoelétrico gere energia elétrica adicional, e o permutador de calor faça um aproveitamento térmico a partir de um fluido (água). Com esta combinação pretende-se não apenas aumentar a produção elétrica e térmica do módulo solar híbrido, mas também melhorar a eficiência de produção dos módulos fotovoltaicos a partir do arrefecimento dos mesmos com o fluido utilizado (água). Assim, durante a realização experimental foram registadas não apenas as grandezas elétricas, como correntes e tensões, mas também grandezas como a temperatura que todo módulo estava sujeito, como é o caso da temperatura frontal do painel fotovoltaico, temperatura entre o módulo termoelétrico e o fotovoltaico, temperatura entre o permutador de calor e o conjunto termoelétrico, assim como as temperaturas de entrada e saída da água do permutador de calor. Também durante os testes práticos foi registado constantemente o valor da intensidade da radiação solar que atingia o módulo fotovoltaico. De uma forma comparativa para se verificar a melhoria nos valores da temperatura e do calor dissipado pelo módulo fotovoltaico problema do aumento da temperatura dos módulos fotovoltaicos, também foram realizados testes com um módulo fotovoltaico convencional, sujeito à mesma radiação solar que o módulo híbrido.

## **Palavras-chave**

Energia solar, módulo fotovoltaico, conjunto termoelétrico, energia térmica, módulo solar híbrido.

# **Abstract**

Harnessing energy from sunlight is a promising way to address the energy crisis, climate change, and decarbonization. Solar energy has garnered attention and greatly aided in diversifying energy generation sources due to its clean and sustainable energy development characteristics. Photovoltaic and thermal solar systems are two technologies that allow for the direct conversion of solar energy into electric and thermal energy. This dissertation aims to increase the efficiency of a photovoltaic panel, simultaneously boosting electrical power with the cogeneration of thermoelectric modules, and recovering the heat dissipated by the photovoltaic panel. The focus of this work was on reconstructing and making the necessary changes to an existing PV-TEG-T hybrid solar module with the aim of optimizing the system and increasing the power generated based on an experimental evaluation of the module. This module consists of three main components: a photovoltaic module, a thermoelectric module, and a heat exchanger for solar thermal utilization. The coupling was done by placing the thermoelectric module, composed of 16 Peltier cells, at the back of the panel, with the heat exchanger in contact with the cold side of the thermoelectric module. This setup is designed so that the thermoelectric set generates additional electric energy, and the heat exchanger utilizes the thermal energy using a fluid (water). With this combination, the goal is not only to increase the electrical and thermal production of the hybrid solar module but also to enhance the efficiency of the photovoltaic modules by cooling them with the fluid used (water). Thus, during the experimental phase, not only were electrical metrics like currents and voltages recorded, but also variables such as the temperature each module was subjected to, like the front temperature of the photovoltaic panel, the temperature between the thermoelectric and photovoltaic module, the temperature between the heat exchanger and the thermoelectric set, as well as the inlet and outlet temperatures of the water from the heat exchanger. Also, during the practical tests, the intensity of solar radiation hitting the photovoltaic module was continuously recorded. Comparatively, to check the improvement in temperature values and heat dissipated by the photovoltaic module due to the issue of increasing temperatures in photovoltaic modules, tests were also conducted with a conventional photovoltaic module, exposed to the same solar radiation as the hybrid module.

# **Keywords**

Solar energy, photovoltaic module, thermoelectric array, thermal energy, hybrid solar module.

# Índice

Dedicatória.....	ii
Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	iv
Abstract.....	vi
Índice .....	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas .....	xi
1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento do tema .....	1
1.1.1 Breve Relevância as questões decorrentes do aumento da procura de energia .	2
1.1.2 Energia Solar .....	3
1.1.3 Painéis híbridos .....	5
1.1.4 Objetivos e contribuição da dissertação .....	6
1.1.5 Organização da dissertação .....	7
2. Fundamentos teóricos e revisão bibliográfica .....	8
2.1. Introdução.....	8
2.1.1. Tecnologia solar térmica .....	8
2.1.2. Tecnologia solar fotovoltaica .....	10
2.1.2.1. Eficiência energética fotovoltaica .....	11
2.1.3. Tecnologia termoelétrica .....	13
2.1.4. Combinação Fotovoltaica-térmica (PV-T) .....	16
2.1.5. Combinação Fotovoltaica-termoelétrica (PV-TEG) .....	18
2.1.6. Combinação Fotovoltaica-termoelétrica-térmica (PV-TEG-T) .....	19
Materiais e Métodos .....	23
3.1. Introdução.....	23
3.2. Apresentação do modulo híbrido PV-TEG-T .....	23
3.2.1. Painel fotovoltaico .....	23
3.2.2. Células termoelétricas.....	25
3.2.3. Coletor térmico .....	26
3.2.4. Módulo solar PV-TEG-T proposto .....	27
3.3. Apresentação da restante instalação experimental .....	31
3.4. Grandezas a medir .....	34

3.5. Metodologia de ensaio.....	35
<b>3.5.1. Esquemas elétricos.....</b>	<b>36</b>
3.6. Nota conclusiva .....	39
Discussão dos resultados .....	39
4.1. Introdução .....	39
4.2. Descrição dos ensaios realizados .....	39
<b>4.2.1. Ensaio em vazio .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2.2. Ensaio com cargas.....</b>	<b>40</b>
<b>4.2.3. Apresentação de tabelas dos ensaios realizados .....</b>	<b>41</b>
4.3. Análise gráfica dos resultados.....	46
4.4. Grandezas calculadas .....	51
Discussão geral dos resultados.....	52
5.1. Conclusões finais .....	53
5.2. Sugestões para futuros trabalhos .....	53
Referências.....	54

# Lista de Figuras

Figura 2.1- Coletores solares concentrados [11]. .....	9
Figura 2.2 - Curva I-V e P-V de uma célula fotovoltaica, Kuczynski et al., 2023. ....	12
Figura 3 1 - Diagrama das células termoelétricas, TEGs em (a) e TECs em (b) [17]. ....	14
Figura 3 2 - Painéis fotovoltaicos adquiridos. ....	24
Figura 3 3 - Representação das células de termoelétricas TC1-12708. ....	26
Figura 3 4 - Placas de alumínio já feitas para construção do permutador de calor. ....	27
Figura 3 5 - Placa de isolamento para o modulo solar híbrido. ....	28
Figura 3 6 - Recortes para a construção do isolamento feito no FabLab. ....	28
Figura 3 7 - Caixa de isolamento já com o permutador de calor. ....	29
Figura 3 8 - Massa térmica utilizada. ....	29
Figura 3 9 - Colocação das células termoelétricas. ....	30
Figura 3 10 - Colocação do painel fotovoltaico. ....	30
Figura 3 11 - Termopares do tipo T, utilizado para medir as temperaturas dos módulos. .....	31
Figura 3 12 - Bancada de ensaio. ....	32
Figura 3 13 - Voltímetro (lado esquerdo) e amperímetro (lado direito) usado para medição das grandezas elétricas. ....	32
Figura 3 14 - Placas utilizadas para montagem do circuito elétrico (fotovoltaico e termoelétrico). ....	33
Figura 3 15 - Solarímetro e datalogger. ....	34
Figura 3 16 - Esquema elétrico do módulo termoeletrico, com ligações em série em cada setor. ....	36
Figura 3 17 - Esquemas de ligações por setor das células termelétricas. ....	37
Figura 3 18 - Circuito elétrico para o módulo fotovoltaico e termoelétrico .....	37
Figura 4.1 - Gráfico da curva de corrente-tensão do painel fotovoltaico híbrido e isolado, referente ao primeiro ensaio. ....	46
Figura 4 2 - Curva característica corrente-tensão para os painéis fotovoltaicos para o segundo ensaio. ....	46
Figura 4.3 - Gráfico de curva corrente-tensão dos painéis fotovoltaicos referente a terceiro ensaio. ....	47
Figura 4.4 - Gráfico de curva corrente-tensão dos painéis fotovoltaicos isolado e híbrido para o quarto ensaio. ....	47
Figura 4.5 - Curva I-V dos painéis fotovoltaicos do quinto ensaio. ....	48

Figura 4.6 - Curva característica corrente-tensão fotovoltaicas, para o sexto ensaio. ....	48
Figura 4.7 - Curva I-V do conjunto termoelétrico referente ao primeiro ensaio deste conjunto. ....	49
Figura 4.8 - Gráfico da curva I-V, referente terceiro ensaio, para o módulo termoeletrico. ....	49
Figura 4 9 - Gráfico da potência total termoelétrica, fotovoltaica isolada e híbrida para todos os ensaios.....	50
Figura 4 10 - Gráfico da potência térmica total. ....	50

## **Lista de Tabelas**

Tabela 3.1- Característica dos painéis fotovoltaicos.....	24
Tabela 3.2- Características das células termoelétricas TC1-12708.....	25
Tabela 3.3 - Comparações dos vários tipos de alumínio. ....	26
Tabela 3 4 - Grandezas medidas em cada ensaio realizado.....	35



# Capítulo 1

## 1. Introdução

Neste primeiro capítulo vai se fazer uma breve referência e apresentação geral sobre a energia solar e sobre as diferentes formas de como pode ser coletada, armazenada e distribuída para posteriormente ser utilizada como forma de suprimir as necessidades energéticas diariamente da sociedade. Assim como a introdução do conceito e objetivo dos painéis híbridos.

### 1.1. Enquadramento do tema

Desde os tempos mais remotos, que a humanidade tem aproveitado o recurso de energia solar para fornecer conforto térmico interno nas residências, como é o caso dos antigos egípcios, que foram considerados as primeiras sociedades a usarem esta fonte de energia em larga escala para aquecer as suas casas, onde utilizavam o princípio da massa térmica, que envolvia a construção de casas com altas paredes de armazenamento térmico para armazenar o calor do sol durante o dia e posteriormente este ser utilizado durante a noite para o aquecimento das casas. Hoje, a energia solar tem sido explorada de várias formas, desde aplicações fotovoltaicas em telhados até fotovoltaica integrada ao edifício de fachada, mas na maioria dos edifícios ainda usam energia elétrica gerada por tecnologias convencionais que dependem de combustíveis fósseis, por isso as tecnologias solares foram integradas principalmente para economizar energia, aumentar a sustentabilidade e limitar a emissão de gases de efeito estufa [1]. No entanto, o aproveitamento da energia solar a partir das diferentes tecnologias utilizadas, como é o caso da tecnologia fotovoltaica tem provocado um baixo rendimento na produção de energia elétrica, devido ao aumento da temperatura das células o que conseqüentemente provoca grandes perdas de energia elétrica desta tecnologia. Para resolver estas questões é necessário a implementação de sistemas solares híbridos com boa gestão de energia de modo a equilibrar a produção, consumo e armazenamento. E uma das combinações híbridas mais utilizadas no aproveitamento da energia solar são a tecnologia solar fotovoltaica e a tecnologia solar térmica [2]. Desta forma, a luz solar que atinge as células fotovoltaicas é diretamente convertida em energia elétrica, mas o calor dissipado devido ao aquecimento da mesma é recuperado através da tecnologia solar térmica para aquecer e/ou arrefecer um fluido que pode ser ar ou água e conseqüentemente as células fotovoltaicas são arrefecidas de forma a aumentar a sua eficiência de produção. Por outro lado, durante a produção de energia elétrica a partir de fonte renováveis, como é o caso

da energia solar, que sofre irregularidades periódicas, devido as variações climáticas, em dias nublados, por exemplo, as capacidades de produção de energia elétrica das células solares podem ser reduzidas em cerca de 70%. Com a crescente integração de fontes de energia renovável imprevisíveis na rede elétrica, esse desafio cresceu em importância e complexidade. Portanto, desenvolver vários métodos para produção de energia elétrica a partir da fonte solar, requer aplicar sistemas de gestão de energia que otimizem o desempenho geral do sistema de energia, usando técnicas modernas e gerenciar adequadamente os sistemas híbridos de energia, de modo a reduzir os efeitos da natureza intermitente na produção de energia solar. O principal objetivo dessas integrações é garantir um fornecimento contínuo de energia durante todo o dia ao menor custo. Assim, vários estudos foram feitos para a combinar diferentes sistemas de energia para fornecer maior produção de energia livre de carbono [4].

#### 1.1.1 Breve Relevância as questões decorrentes do aumento da procura de energia

O atual sistema de energia está espalhado pelo mundo todo, e é baseado na queima de combustíveis fósseis, que são fontes não renováveis e insustentável. Por outro lado, a estimativa de crescimento da população mundial em 2050 é aproximadamente 9,3 milhão de milhões, o que levará a um aumento exponencial da demanda global de energia e conseqüentemente ao esgotamento dos combustíveis fósseis após cerca de 70 anos [2]. Os combustíveis fósseis são as fontes de energia mais utilizadas a nível mundial, abastecendo cerca de 80% da demanda de energia em todo mundo. A utilização destas fontes de energia tem provocado dois grandes problemas na humanidade que são o aquecimento global devido às mudanças climáticas provocadas pelo aumento das emissões de carbono e o risco de escassez de energia devido ao abastecimento cada vez menor dos combustíveis fósseis. Por outra, maior parte das emissões de gases de efeito estufa são provocadas pelas atividades realizadas pelo homem, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis para obter energia elétrica. Desta forma, para a resolução destes problemas, exigem ações rápidas de modo a minimizar o consumo de energia, aumentar a incorporação de fontes de energias renováveis e iniciar assim o uso sustentável dos recursos naturais. Espera-se assim que as fontes de energia renováveis forneçam soluções, alternativas viáveis para resolver os problemas de alto consumo de energia e impactos ambientais negativos. Ao contrário dos combustíveis fósseis, que apenas concentram-se em determinados países, os recursos energéticos de fontes renováveis estão espalhados em toda a parte do mundo [1]. Assim, questões como segurança energética, mitigação das mudanças climáticas e os benefícios económicos podem ser significativamente melhorados com a implantação de fontes de energia

renováveis e tecnologias energeticamente eficientes [3]. De acordo com uma avaliação recente da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), em 2022 foram coletados cerca de 3068 GWh de energia provenientes de fontes renováveis. Existem várias fontes de energia renováveis disponíveis na natureza que são atualmente utilizados com intuito de reduzir ou eliminar o uso de combustíveis fósseis, através de diferentes métodos que atualmente continuam a serem estudados e implementados por muitos pesquisadores [4]. No entanto, uma das fontes de energia renováveis que tem se destacado atualmente é a tecnologia de energia solar. A energia solar é o recurso de energia renovável mais abundante e disponível gratuitamente em todo mundo. Também é uma fonte inesgotável de energia limpa e oferece uma excelente alternativa para a redução ou eliminação do uso dos combustíveis fósseis para maioria dos países em todo mundo [1].

### 1.1.2 Energia Solar

A energia solar é um recurso de energia renovável que tem sido aproveitado direta e indiretamente para fornecer não só conforto térmico para os edifícios domésticos e comerciais, mas também eletricidade para os mesmos. No entanto, como a maioria dos edifícios contemporâneos ainda usam energia elétrica provenientes das fontes convencionais que ainda dependem de combustíveis fósseis, as tecnologias solares foram integradas com o principal objetivo de economizar, aumentar a sustentabilidade e limitar a emissão de carbono. Portanto, a contribuição das tecnologias solares tem sido notável na economia de energia destinada ao aquecimento de ar e água, arrefecimento, ventilação, iluminação e eletricidade. Podemos classificar em duas formas diferentes para coletar, armazenar e distribuir a energia solar, que são solar térmica e solar fotovoltaica [1]. A energia solar é convertida em energia térmica e elétrica em todas as tecnologias solares. O aproveitamento da energia solar térmica pode ser através de projeto solar passivo que são sistemas que geralmente não usam dispositivos mecânicos como bombas e ventiladores para coletar, armazenar e distribuir a energia solar. Ao invés disso aproveitam o fluxo de calor proveniente da radiação solar para distribuir o calor. E não consomem energia elétrica e nem convertem a energia térmica ou luminosa do sol em eletricidade, a principal função destes projetos é fornecer aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação aos edifícios [1]. E o aproveitamento deste projeto pode ser feito por ganhos solares diretos, que ocorre quando a luz do sol incide diretamente no espaço a ser aquecido, e o calor absorvido e armazenado pelas paredes interiores dos edifícios é posteriormente liberado em período de baixa irradiação solar. Ou por ganhos indiretos, que acontece quando a radiação solar não incide diretamente no espaço a aquecer, mas sim numa massa acumuladora, como as paredes de trombe ou

tubos de água (Roriz, 2010) que armazena o calor do sol que depois é liberado no interior do edifício por condução, convecção ou radiação. Por fim, o aproveitamento pode ser ainda por ganhos solares isolados, em que o aproveitamento da luz solar é feito quando ela incide numa zona envidraçada contígua ao edifício, e que atuam como coletores solares, por exemplo uma estufa [1].

A segunda forma de aproveitar a energia solar térmica é através de projetos solares ativos. Ao contrário dos projetos anteriores, os projetos solares ativos requerem o uso de equipamentos mecânicos e elétricos como bombas e ventiladores, para coletar, armazenar e distribuir a energia solar. Geralmente estes projetos para o aproveitamento solar térmico concentram-se nas aplicações domésticas e comerciais, como por exemplo aquecimento de ar e água. Nestas aplicações são usados coletores solares como coletores de placa plana, coletores de tubo evacuados que absorvem a irradiação solar e a convertem em energia térmica e, que é posteriormente transferida para o edifício na forma de ar ou água quente por meio de ventiladores ou bombas [1].

Já no caso do aproveitamento da energia solar fotovoltaica em eletricidade ocorre devido ao efeito fotovoltaico, que foi descoberto pela primeira vez por Edmundo Becquerel em 1839. Este efeito ocorre em materiais conhecidos como semicondutores que apresentam duas bandas de energia, uma banda de valência onde existe a presença dos elétrons e uma banda de condução onde não há elétrons. O objetivo principal da radiação solar no efeito fotovoltaico é fornecer uma quantidade de energia ao elétron mais afastado para possibilitar que ele passe da banda de valência para a banda de condução do material de forma a gerar eletricidade. Desta forma, a unidade básica do sistema fotovoltaico é constituída por célula solar ou célula fotovoltaica (Roriz, 210). Esta célula fotovoltaica é formada por uma junção P-N incorporada dentro de um material semicondutor, desenvolvida através de uma fototensão. A junção P-N é a principal parte de uma célula fotovoltaica onde a parte que recebe a luz solar constitui o material do tipo N, e abaixo deste esta a parte do material do tipo P. Portanto, um sistema solar fotovoltaico típico, consiste em quatro elementos básicos, um modulo fotovoltaico composto por células fotovoltaicas e que convertem diretamente a luz solar em eletricidade; um controlador de carga que evita as sobrecargas ou descargas completas das baterias; um inversor que converte a energia fotovoltaica gerada pelas células (DC) em corrente alternada nos níveis de tensão AC e frequência da rede e por uma bateria que serve para armazenar o excesso de energia produzida pelos módulos a fim de ser usada a noite ou em dias com pouca insolação [5].

O uso da energia solar fotovoltaica tem sido aplicada em várias áreas como projetos espaciais, iluminação de rua, telecomunicações, satélites, construção de edifícios, entre outros. Em particular no setor da construção tem atraído muita atenção não só pela sua capacidade de fornecer energia limpa e sustentável, mas também devido à sua capacidade de ser integrada como material de construção, por isso é normalmente chamada de fotovoltaica integrada ao edifício (do inglês, *building integrated photovoltaics*). É uma fonte de energia solar que possui inúmeras vantagens como baixo custo de operação e manutenção, livre de emissões de carbono ao meio ambiente, sistema confiável e com grandes capacidades para suprimir as necessidades de energia elétrica nos próximos anos [5].

### 1.1.3 Painéis híbridos

As tecnologias solares que existem convertem a radiação solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico das células solares que compõem um painel fotovoltaico e em energia térmica através dos coletores solares térmicos que aproveitam a absorção da radiação infravermelha para aquecimento de um fluido. Estas formas de conversão são realizadas separadamente. Contudo a eficiência da célula fotovoltaica decresce devido ao seu natural aquecimento, quando são expostas a radiação solar, esta situação deve-se principalmente à absorção por parte das células, da radiação solar incidente na sua forma de energia infravermelha que não é convertida em energia elétrica. Em um painel fotovoltaico convencional o calor gerado pelas células não é utilizado, sendo desperdiçado para a envolvente. Para isso, foi preciso implementar estratégias de modo a extrair o calor das células, o que significa um arrefecimento ativo e ao mesmo tempo fazer o uso desta energia. Assim, a solução a considerar traduz-se num mecanismo que converta a radiação solar em energia elétrica através da célula fotovoltaica e simultaneamente produza energia térmica num coletor térmico, tendo em conta a transferência do calor extraído das células fotovoltaicas para um fluido térmico. Esta alternativa de cogeração que produz eletricidade e calor em simultâneo denomina-se de módulo solar híbrido fotovoltaico-térmico. Esta combinação gera grandes vantagens não só no aumento da eficiência das células fotovoltaicas por unidade de área devido ao arrefecimento das mesmas, mas também o aproveitamento das perdas de calor das células solares e conseqüentemente a diminuição na área de instalação de equipamentos solares. Para este trabalho experimental foram implementadas três diferentes tecnologias solares com o principal objetivo de aumentar a eficiência elétrica de produção do módulo fotovoltaico e gerar energia térmica através das perdas de calor extraído das células fotovoltaicas [6]. O módulo solar híbrido onde foram realizados os ensaios experimental utilizou água como fluido térmico. Nos próximos capítulos serão

abordadas as diferentes tecnologias solares utilizadas para a concretização deste trabalho bem como a realização dos ensaios experimentais do mesmo.

#### 1.1.4 Objetivos e contribuição da dissertação

O objetivo principal desta dissertação consiste em avaliar o desempenho e o aumento da quantidade de energia elétrica e térmica produzida por um módulo solar híbrido fotovoltaico, termoelétrico e térmico.

Assim sendo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Calcular a potência produzida pelo painel fotovoltaico do módulo híbrido;
- Calcular a potência produzida pelo painel fotovoltaico isolado;
- Calcular a potência produzida pelo conjunto termoelétrico do módulo híbrido;
- Calcular a potência térmica entregue ao permutador de calor do módulo híbrido;
- Determinar a energia total produzida pelo módulo solar híbrido;
- Determinar o rendimento dos painéis fotovoltaicos utilizados (isolado e híbrido).

A energia solar enfrenta obstáculos significativos que podem impedir a sua rápida expansão. Estes obstáculos podem ser caracterizados em termos de tecnologia, política, economia e confiabilidade. O ajuste destas questões, por outro lado, reduz os inconvenientes e melhora a confiabilidade do sistema de energia solar, do que resulta numa maior otimização da energia solar que pode ajudar a aliviar a incerteza da produção. A tecnologia de energia fotovoltaica está sendo fortemente investida para melhorar a eficiência e a viabilidade econômica [7]. A geração de energia elétrica a partir dos painéis fotovoltaicos tornou-se o principal método de utilização de energia proveniente do sol devido a sua simplicidade à medida que a demanda mundial de energia cresce [8]. Países como China, Estados Unidos e Japão lideram nas capacidades instaladas de energia fotovoltaica à nível mundial. Onde a China lidera com 36%, o Japão e os Estados Unidos com 11% e 13%, respetivamente [7]. As aplicações comerciais e residências têm vindo a registar um aumento muito relevantes na utilização solar fotovoltaica. No entanto umas das maiores preocupações atuais dos painéis fotovoltaicos é aumentar o seu valor de rendimento, de forma a ter um aproveitamento amplo de toda a radiação solar que atinge a superfície do painel fotovoltaico. Neste trabalho de dissertação pretende-se aproveitar do desperdício de energia solar não aproveitado pelos

módulos fotovoltaicos e simultaneamente aumentar a eficiência de produção destes módulos fotovoltaicos.

#### 1.1.5 Organização da dissertação

A presente dissertação esta constituída por cinco capítulos, tendo como principal tema a avaliação do desempenho de um módulo solar construído de forma a extrair uma maior quantidade de energia solar.

O primeiro capítulo foi dedicado à introdução, constituído pelas secções do enquadramento do tema e breve relevância, objetivos e contribuições da dissertação.

O segundo capítulo foi dedicado aos fundamentos teóricos e bem com uma revisão bibliográfica das principais tecnologias solares que fazem parte do acoplamento do módulo solar construído para a realização do trabalho.

O terceiro capítulo destina-se a á apresentação geral dos materiais e métodos utilizados para a realização da parte experimental deste trabalho.

Já o quarto capítulo foi dedicado á discussão geral dos resultados apresentados em forma de gráficos e tabelas.

Por fim, no quinto capítulo será feita a conclusão final deste trabalho experimental e serão dadas algumas sugestões sobre futuros trabalhos.

# Capítulo 2

## 2. Fundamentos teóricos e revisão bibliográfica

### 2.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as diferentes tecnologias solares para a conversão da radiação solar e também como elas foram combinadas ao longo dos anos, com o propósito de quantificar a produção das mesmas tecnologias.

#### 2.1.1. Tecnologia solar térmica

A energia solar térmica é uma fonte de energia renovável que tem vindo a ser utilizada amplamente em todo mundo, em aplicações que variam desde aquecedores solares domésticos até sofisticados parques solares para geração de energia [9]. Convencionalmente as tecnologias solares térmicas são classificadas em termossifão, circulação forçada e coletores solares térmicos. O sistema de termossifão é um sistema de circulação natural do fluido de transferência de calor, que faz circular o fluido de transferência de calor através do coletor devido a diferença de temperatura entre a parte inferior e superior do coletor [10]. Esta variação de densidade ao longo do coletor é formada devido a energia solar que aquece o absorvedor e isso faz com que a densidade do fluido de transferência de calor no coletor diminua. Assim, o fluido frio no tanque desce e o quente sobe, desta forma, obtém-se a circulação pelo coletor. Este sistema também é chamado de sistema passivo e são considerados dispositivos de coleta e utilização de energia solar mais simples e destinam-se ao fornecimento de água quente para o uso doméstico e baseiam-se na circulação natural, como já foi referido e conseguem fornecer água quente a uma temperatura de cerca de 60°C e consistem em um coletor, um tanque de armazenamento e tubos de conexão [11]. A segunda tecnologia, é o sistema de circulação forçada ou sistemas ativos, estes sistemas são aqueles que utilizam uma bomba de circulação para retirar o calor do absorvedor. Geralmente esta bomba é controlada por um termostato diferencial que recebe as temperaturas do fundo do tanque do fluido quente e da saída do coletor. Para estes sistemas é necessário estabelecer uma diferença de temperatura para o funcionamento da bomba [10]. Ao contrário dos sistemas de termossifão que são usados para aplicações domésticas de pequena escala para aquecimento de água, os sistemas de circulação forçada são apropriadas para aplicações de grande escala em regiões com baixas temperaturas ambiente, e consistem no uso de uma série de coletores conectados ao tanque de

armazenamento térmico por meio de tubos conectados. Estes sistemas dispensam a instalação do tanque acima da saída dos coletores, como acontece com os sistemas de termossifão, por isso podem ser instalados dentro da residência. Os sistemas de circulação forçada possuem melhor desempenho do que os sistemas de termossifão, embora sejam mais caro [12]. Por fim temos os coletores solares térmicos são dispositivos de extração de calor que convertem a radiação solar em energia térmica através de um fluido de forma a aumentar a sua temperatura [13]. Os coletores solares térmicos podem ser do tipo estacionários que são aqueles que possuem uma zona de intercetção e absorção semelhante e são colocados de forma a ampliar a coleta da radiação solar. Quanto á localização destes coletores, é definida com base no ângulo de inclinação e orientação, que dependem da latitude geográfica. Geralmente estes coletores podem ser coletores de placa plana, parabólicos compostos estacionários e de tubos evacuados. E também podem ser do tipo que concentram a radiação solar, que são aqueles que possuem refletores côncavos externos para capturar e focar a radiação solar numa zona de coleta reduzida, de forma a obter um aumento no fluxo de calor. E podem ser categorizados em quatro elementos: coletor solar de calha parabólica, refletor de Fresnel linear, refletor parabólico e recetor central ou refletor de campo heliostato. A figura 2.1 mostra uma representação destes tipos de coletores solares concentrados.

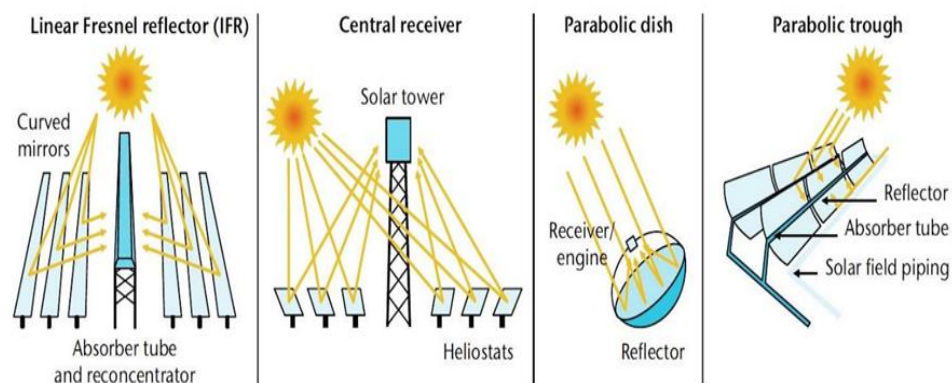


Figura 2.1- Coletores solares concentrados [11].

Os coletores solares concentrados têm grandes vantagens sobre os coletores não concentrados, pois a eficiência térmica alcançada é maior, porque o fluido de trabalho consegue atingir temperaturas muito altas, devido á menor área de perda de calor [14].

### 2.1.2. Tecnologia solar fotovoltaica

A energia fotovoltaica é a conversão direta da luz solar em eletricidade, que é realizada por meio de células fotovoltaicas. As células solares são feitas com camadas de um material semicondutor através do qual a luz cria um campo elétrico, fazendo eletricidade fluir. Estas células são revestidas com um material anti-reflexo para limitar a reflexão da luz na sua superfície e absorver a quantidade máxima de radiação solar possível. A intensidade de luz absorvida por uma célula solar determina a quantidade de energia gerada [15]. As tecnologias fotovoltaicas geralmente são classificadas em células de silício cristalino, células de filme fino e células orgânicas, dependendo da matéria-prima usada para sua fabricação e do custo comercial. As células fotovoltaicas de silício cristalino geralmente são consideradas de células fotovoltaicas de primeira geração. O silício é o segundo elemento mais abundante na Terra, por isso é um dos materiais mais utilizado para fabricar os módulos fotovoltaicos e representa cerca de 90% do mercado das células fotovoltaicas. É um material estável e não tóxico, possui um valor de banda gap de 1,12 eV dentro dos requisitos ideais dos materiais considerados para as células solares (entre 1,1 e 1,7 eV), este valor de banda gap do silício é aceite dentro da faixa do espectro eletromagnético emitido pela radiação solar. E também as células fotovoltaicas feitas de silício são compatíveis com a indústria de microeletrônica baseada em silício, como é o caso da fabricação de transistores e circuitos integrados. As células fotovoltaicas de silício podem ser monocristalinas e policristalinas. As células de silício monocristalinos (c-Si) são aquelas feitas pelo processo de Czochralski e apresentam eficiência de conversão de energia excelente, embora possuam custos elevados de fabricação, necessidades maiores de energia durante o seu ciclo de vida, longo tempo de retorno de energia e precisam de uma estrutura cristalina perfeita e materiais muito puros. Já as células de silício policristalinos (p-Si) foram desenvolvidas com o intuito de baixar o custo de fabricação e aumentar a taxa de produção da indústria fotovoltaica. As células policristalinas embora tenham um custo mais baixo de produção, são menos eficientes do que as células monocristalinas [5]. No entanto, possuem outras vantagens como melhor aspecto estético, menor consumo de energia durante seu ciclo de vida, menor tempo de retorno energético e a estrutura e o material cristalino não precisam ser perfeitos. A segunda classificação das tecnologias fotovoltaicas são as células solares de filme fino. Estas células requerem muito menos material semicondutor para serem fabricados e absorvem a mesma quantidade de luz solar de cerca de 99% , que as células de silício cristalino. A utilização desta tecnologia tem vindo a crescer nos últimos anos devido á sua elevada flexibilidade, fácil instalação, eficiência de luz difusa aproximadamente de 12% e vida útil de 25 anos, mas possuem uma taxa baixa de eficiência, em média conseguem converter cerca de 5 à 13% da radiação solar em eletricidade, em comparação com as células de silício cristalino que conseguem de 11 a

20% da luz solar em energia elétrica. As principais células baseadas nestas tecnologias são as células de silício amorfo (a-Si) que diferem das células de silício cristalino porque os átomos de silício amorfo são localizados aleatoriamente entre si. Esta aleatoriedade na estrutura atômica tem um efeito importante nas propriedades eletrônicas do material, causando uma lacuna maior de 1,7 eV. Por fim, temos a tecnologia de células fotovoltaicas orgânicas que oferecem um potencial ao longo prazo e economicamente viável para geração de energia elétrica em grande escala, uma vez que os semicondutores orgânicos são uma alternativa que possuem custos baixos em comparação com os semicondutores de silício. As células solares orgânicas têm características que as tornam muito interessante, entre elas o potencial de serem muito flexíveis e semitransparentes, serem fabricadas em processo de impressão contínua, área de revestimento extensa, integração em diferentes dispositivos e custos reduzido. Estas características permitem uma redução significativa no custo de instalação de até 70%. No entanto, estas células possuem tempo de vida muito limitado, pois ainda não são capazes de converter a luz solar em eletricidade com as mesmas eficiências das células de silício cristalino, a baixa eficiência deve-se à baixa absorção da luz solar incidente, devido às células orgânicas apresentar um valor de gap energético de 2,0 eV, o que limita a absorção de fótons solares em torno de 30% [5]. A tecnologia solar fotovoltaica avançou dramaticamente nos últimos anos, no entanto, ainda não se revelou suficiente e requer mais investigação. A baixa eficiência de conversão da tecnologia solar fotovoltaica em comparação com os sistemas convencionais continua a ser o obstáculo tecnológico mais significativo no desenvolvimento de sistemas de energia solar. Outra restrição é a incapacidade das células fotovoltaicas de responder imediatamente à demanda de energia. Este problema não ocorre em células convencionais, o que resulta em aumento da eficiência. Numerosos estudos também demonstram uma variedade de desafios tecnológicos adicionais no desenvolvimento da geração de energia solar, incluindo a natureza intermitente da radiação solar, que prejudica a capacidade do sistema fotovoltaico de atender à demanda do consumidor, bem como diferenças entre condições padrão e em tempo real, que afetam o desempenho. Quando uma célula falha, o sistema solar fotovoltaico frequentemente fica todo afetado até ser substituída [16].

#### 2.1.2.1. Eficiência energética fotovoltaica

Medir o desempenho de uma célula solar significa avaliar a sua capacidade de produzir energia elétrica, ou seja, determinar as suas características elétricas. Deste modo, podemos obter a conhecida relação corrente-tensão (Roriz, 2010). Na figura 2.2 está

representada a curva característica I-V de uma célula fotovoltaica, onde se pode verificar que a corrente se mantém constante desde curto-circuito ( $V=0V$ ) até um determinado valor de resistência na carga. Onde para o circuito aberto a corrente é zero ( $I=0A$ ) e a tensão é máxima, e para o curto-circuito a corrente é máxima e a tensão é zero, estes são alguns pontos específicos de operação que constituem os valores utilizados para definir e comparar o comportamento elétrico de uma célula fotovoltaica. A curva I-V varia em função à radiação solar, no entanto mantém o comportamento da linha. Como é de esperar, à medida que aumenta a radiação incidente nas células fotovoltaicas, maior é a energia convertida devido ao aumento da corrente. Para além da curva I-V também é possível fazer um melhor aproveitamento do sistema solar fotovoltaico a partir da curva de potência que funciona sob diferentes valores de corrente e tensão. Assim, se aumentarmos o valor da carga elétrica numa célula fotovoltaica iluminada desde o valor zero ( $R=0 \Omega$ ) até um valor elevado ( $R=\infty$ ), é possível determinar o ponto de máxima potência, que permite, por conseguinte, obter o ponto que representa a máxima energia elétrica para aquele nível de radiação, e é considerada o ponto de melhor eficiência da célula solar. E este ponto não ocorre quando a corrente e tensão são máximas, por causa dos materiais utilizados nas células e condutores, como é mostrado na figura 2.1.

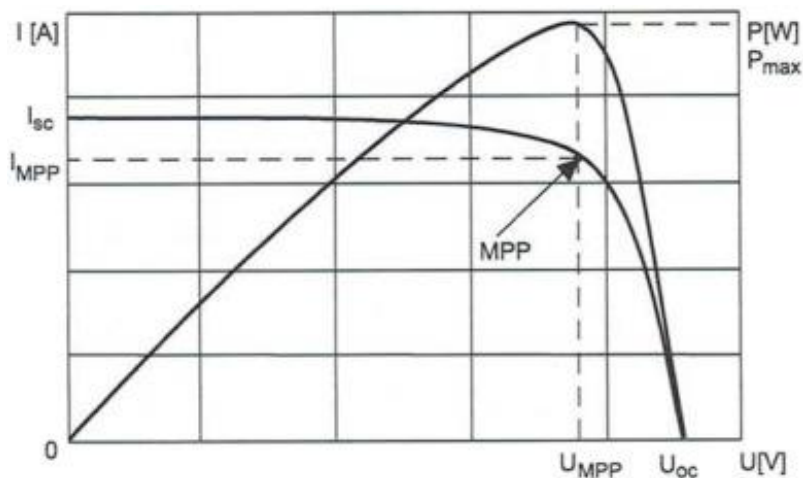


Figura 2.2 - Curva I-V e P-V de uma célula fotovoltaica, Kuczynski et al., 2023.

A eficiência de uma célula fotovoltaica não só depende da radiação solar e da temperatura que atinge a superfície do painel, mas também de fatores como poeira, as características dos materiais e soluções construtivas usadas que podem limitar o desempenho da célula fotovoltaica, e, por conseguinte, verificar-se perdas de energia da radiação incidente antes de ser convertida em eletricidade. A eficiência ou o rendimento de uma célula fotovoltaica determina a quantidade de energia solar convertida em energia útil, e este

valor é obtido na divisão da potência de saída da célula fotovoltaica sobre a potência de entrada, que resulta do produto da radiação incidente e da área do painel fotovoltaico, como é expressa na equação 2.1 [17].

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.1)$$

### 2.1.3. Tecnologia termoelétrica

A demanda cada vez maior por recursos energéticos renováveis e sustentáveis, ecologicamente corretos e econômicos, têm-se tornado num dos principais desafios dos pesquisadores e investigadores na superação das necessidades energéticas da sociedade e das indústrias em particular. Na categoria de sistemas de energia, como alternativa livre de poluição ambiental, a energia solar tem contribuído predominantemente para o campo da geração de energia. Tecnologias solares, como a termoelétrica que se baseia na técnica de estado sólido, tem-se mostrado significativamente interessante para aplicações de geração de energia elétrica por recuperação de calor residual e aplicações de arrefecimento. A tecnologia termoelétrica é capaz de coletar diretamente o calor residual e convertê-lo em eletricidade, sem necessidades de peças móveis. Os dispositivos termoelétricos são conjuntos de termopares conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo. Para a fabricação dos termopares são usados vários materiais condutores e semicondutores, no entanto, é necessária uma escolha cuidadosa desses materiais para obter melhores desempenhos elétricos [18]. A tecnologia termoelétrica é geralmente categorizada em células TEGs e células TECs. As células TEGs (do Inglês, *generator thermoelectric*) são normalmente usadas para produção de energia quando dois materiais estão em temperaturas diferentes, e as células TECs (do Inglês - *thermoelectric cooler*) são utilizadas para fins de arrefecimento quando uma tensão de polarização é aplicada aos dois materiais [19]. As células TEGs são dispositivos termoelétricos que convertem o calor residual diretamente em energia elétrica. Estas células são baseadas no efeito de Seebeck, que foi descoberto em 1822 pelo físico alemão Thomas J. Seebeck. É um efeito que ocorre quando uma junção de dois condutores diferentes é mantida em um gradiente de temperatura, permitindo que os portadores de carga se difundam da extremidade quente para extremidade fria, resultando assim numa carga líquida acumulada na extremidade fria, gerando um potencial induzido que aciona uma corrente quando conectado em um circuito. Este efeito pode ser aproximado sob condições de circuito aberto como a razão de tensão induzida ao gradiente de temperatura que ocorre na junção, esta tensão (V) é diretamente proporcional à diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) entre os lados quente e frio, como mostra a equação 2.2 [20].

$$V = \alpha \Delta T \quad (2.2)$$

Onde  $\alpha$  é o coeficiente de Seebeck. Já as células TECs são células baseadas no efeito de Peltier que é oposto ao de Seebeck. Este efeito que foi descoberto em 1834 pelo físico francês Jean C. A. Peltier, mostra que, quando uma corrente contínua flui num circuito de junção bimetálica do material, produz um efeito de arrefecimento ou aquecimento que depende da direção da corrente. A expressão 2.3 mostra que a quantidade de calor ( $Q_c$ ) nas junções é proporcional a corrente (I) [21]. Em que o coeficiente de Peltier é medido por W/A e a quantidade de calor nas junções dos materiais por Watts.

$$Q_c = \pi I \quad (2.3)$$

Os geradores ou módulos termoelétricos podem ser divididos em duas categorias: o primeiro é para aplicações industriais que fornece potência de saída que varia de alguns Watts para centenas de Watts na região de alta temperatura. A segunda categoria é aplicada para a recuperação do calor desperdiçado, em que a energia gerada é apenas de  $\mu$ Watts a alguns mili-watts [20]. Na figura 2.3 esta representado um esquema das células termelétricas baseada nos dois efeitos.

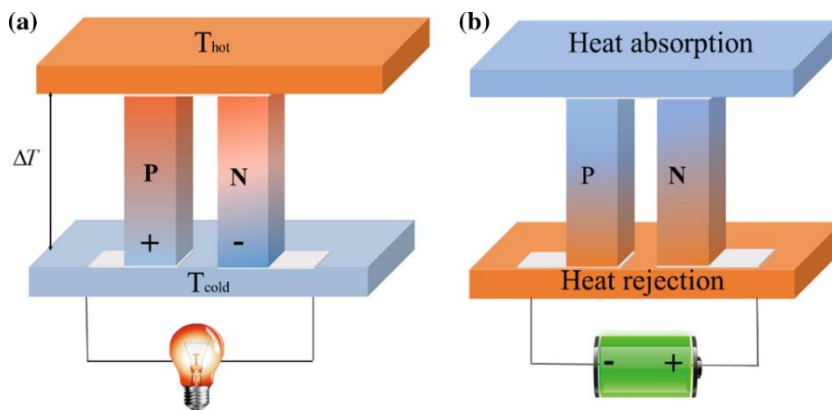


Figura 3 1 - Diagrama das células termoelétricas, TEGs em (a) e TECs em (b) [17].

Um grande desafio da tecnologia termoelétrica é converter efetivamente a maior parte do calor residual em energia elétrica numa faixa de temperatura média a altas temperaturas, onde esse calor está a ser desperdiçado. Esta é uma das desvantagens enfrentadas pelos módulos termoelétricos a sua baixa eficiência de conversão. Para o desenvolvimento desta tecnologia é preciso uma grande eficiência termoelétrica, que tem

sido difícil de se alcançar, mas talvez com o aumento de materiais mais eficientes e altamente abundante se venha ultrapassar este desafio. Embora sempre foi um desafio projetar materiais termoelétricos com alta eficiência, pois requer uma pesquisa aprofundada dos fundamentos de cada parâmetro e subparâmetro das propriedades dos materiais destes dispositivos. Em geral, o desempenho termoelétrico de um material é medido por uma quantidade adimensional conhecida como figura de mérito ( $ZT$ ). A figura de mérito permite conhecer a eficiência de um material termoelétrico durante a conversão do calor em eletricidade. Por isso, quanto maior for este fator, mais eficiente é o material e além disso, o valor de  $ZT$  depende da temperatura de cada material e cada material apresenta o seu alto valor de  $ZT$  em determinada faixa de temperatura [22]. Para um material termoelétrico, a figura de mérito adimensional é expressa como mostrado na equação 2.4.

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho\lambda} \times T \quad (2.4)$$

Onde  $\alpha$  representa o coeficiente de Seebeck (V/K),  $\lambda$  a condutividade térmica do material (W/Km),  $\rho$  a resistividade elétrica ( $\Omega\text{m}$ ) e  $T$  a temperatura do material termoelétrico (K). Como a eficiência de conversão de um módulo termoelétrico esta relacionada com a figura de mérito, então os dispositivos termoelétricos devem apresentar um alto coeficiente de Seebeck, baixa resistividade elétrica e baixa condutividade térmica, de modo a serem considerados bons conversores termoelétricos. No caso dos metais por exemplo, que apresentam baixa resistividade elétrica, alta condutividade térmica e baixo coeficiente de Seebeck, geram um baixo valor de  $ZT$ , o que influencia na conversão termoelétrica dos materiais. Por isso, os materiais semicondutores são considerados melhores conversores termoelétricos por apresentarem um alto valor de  $ZT$ . A eficiência termoelétrica é expressa em função a eficiência de Carnot e da figura adimensional do fator de mérito dos materiais, como mostrado na equação 2.6 [22].

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \quad (2.5)$$

$$\eta = \eta_{\text{Carnot}} \times \frac{(\sqrt{1+ZT}-1)}{\sqrt{1+ZT}+T_c/T_h} \quad (2.6)$$

Onde  $T_h$  e  $T_c$  são as diferenças de temperaturas da parte quente e fria do material termoelétrico e  $\eta$  o rendimento ou eficiência termoelétrica. Muitos estudos continuam a ser realizados para a projeção de novos materiais termoelétricos que apresentam um alto

valor de ZT. Embora um dos maiores problemas enfrentado nestas pesquisas de novos materiais com alto ZT seja a dependência do coeficiente de Seebeck e da condutividade elétrica, que leva à diminuição da concentração de portadores e conseqüentemente à diminuição da condutividade térmica. Além disso, um outro problema encontrado é a dificuldade em minimizar as perdas de calor durante a determinação da condutividade térmica. No entanto, estudos já feitos por pesquisadores conseguiram sintetizar alguns materiais com um valor de  $ZT > 2$ , como é o caso dos  $\text{Cu}_{2-x}\text{Se}$  e  $\text{PbTe}_{0,7}\text{So}_{0,3}$  [22]. É importante desenvolver a tecnologia termoelétrica para geração de energia, arrefecimento ou aquecimento através da recuperação de calor desperdiçado proveniente de várias fontes de calor, de modo a ajudar a satisfazer as demandas energéticas atuais, desenvolvendo materiais termoelétricos altamente eficientes e comparativamente com as outras tecnologias de geração de energia, implementando dispositivos que incluam materiais com baixa resistência térmica e elétrica de modo a funcionarem numa ampla faixa de temperatura e otimizar os designs destes dispositivos, desta forma, ajudará a melhorar a eficiência de conversão dos módulos termoelétricos e a atender aos requisitos da demanda de energia a partir de fontes renováveis [23].

#### 2.1.4. Combinação Fotovoltaica-térmica (PV-T)

O desenvolvimento da energia solar e a sua utilização começou desde 1959, quando as patentes para tecnologias fotovoltaicas e térmicas apareceram pela primeira vez nos Estados Unidos. Desde então muitos pesquisadores e cientistas concentraram-se na abordagem holísticas de módulos fotovoltaicos e térmicos. Realizando vários estudos sobre células fotovoltaicos sob condições de alta temperatura, pressão, umidade e ângulos de inclinação ideal. De igual modo, desenvolvendo estudos sobre desempenho térmico de tubos de absorção de calor (em um coletor de placa plana, por exemplo) e técnica de recuperação de calor para os sistemas solares térmicos [24]. Todas estas pesquisas eram feitas para os módulos fotovoltaicos e térmicos convencionais, onde a perda de energia térmica e elétrica era uma questão intrigante por parte dos investigadores e cientistas, assim desenvolvimentos de projetos numéricos, teóricos, experimentais e revisões sobre aplicações de tecnologias combinadas fotovoltaicos-térmicos foram surgindo com o foco na análise da eficiência, desempenho e meios de extrações de calor dos sistemas combinados PV-T em comparação com os sistemas fotovoltaicos e térmicos convencionais [24] [25]. O sistema PV-T é um novo sistema híbrido emergente para edifícios, que combina a energia solar fotovoltaica e térmica. Esta tecnologia baseia-se em painéis solares híbridos, que produzem simultaneamente eletricidade e calor útil. Este painel solar aumenta a eficiência das células fotovoltaicas ao mesmo tempo que recupera o calor solar emitido pelas células

fotovoltaicas para aquecer um fluido (líquido ou gás. Ao utilizar o sistema de aquecimento solar integrado para arrefecer o painel fotovoltaico, o calor é absorvido pelo fluido de trabalho, diminuindo a temperatura da célula e evitando a redução da eficiência elétrica. Desta forma, uma melhor utilização do espaço é feita bem como o baixo custo de instalação e maior eficiência energética é alcançada no sistema híbrido PV-T [26]. Assim, vários estudos sobre o sistema híbrido PV-T foram desenvolvidos, como é o caso do sistema solar híbrido PV-T para aplicações residenciais [27], onde foi apresentado uma análise matemática sobre o desempenho térmico, elétrico e exergetico do sistema PV-T complementado por um coletor de placa plana para aplicações domésticas típicas. Os resultados mostraram que o sistema híbrido PV-T possui cerca de 11% de eficiência média elétrica, 15% de eficiência exergetica geral e um total de cerca de 56% de eficiência elétrica. Concluindo assim, que o sistema é adequado para aplicações autônomas e que pode ser instalado em áreas remotas para atendimento de necessidade de água quente e energia elétrica [27]. Uma outra pesquisa foi realizada por Lian Zhang e Zijian Chen, 2017, sobre um projeto híbrido PV-T movel descrito a partir dos aspetos de estrutura de aparência, fluxo de energia e circuito de controle. Os resultados experimentais mostraram que o sistema é capaz de gerar 691kWh de energia elétrica e 3047,8 kWh de energia térmica a cada ano em condições normais de trabalho. O estudo confirmou que a aplicação híbrida PV-T movel, para fornecimento de água quente e eletricidade é uma forma viável e energeticamente eficiente para melhorar o desempenho da utilização de energia de sistemas renováveis [24]. Lijie Xu et al., 2019, apresentaram um estudo sobre um sistema híbrido solar fotovoltaico-térmico integrado ao edifício, o sistema funcionava de duas formas para o inverno e verão. No inverno o sistema foi adotado para fornecer aquecimento ambiente e geração de eletricidade para o edifício e durante o verão para criar água quente sanitária e produção de energia elétrica simultaneamente. Os resultados mostraram que o sistema híbrido consegue fornecer diariamente cerca 7,6% de produção média elétrica e 47% de eficiência térmica diária (para fornecimento de água quente sanitária) no verão. E quanto ao aquecimento ambiente no inverno o sistema híbrido é capaz de fornecer 18,6°C de temperatura ao espaço e 12,5% de geração elétrica. Com base nestes resultados experimentais, concluiu-se que o sistema híbrido PV-T integrado ao edifício é capaz de fornecer aquecimento de ar e água, bem como geração de energia elétrica de forma altamente eficiente no inverno quanto no verão [28]. A combinação híbrida fotovoltaica-térmica utiliza a energia solar e consiste em um modulo fotovoltaico típico integrado a um coletor solar térmico, que transfere o calor não utilizado do painel fotovoltaico para o fluido de transferência de calor que pode ser ar ou água, gerando assim eletricidade a partir das células fotovoltaicas e energia térmica em simultâneo [25]. A implementação ampla destes sistemas híbridos PV-T pode continuar

a contribuir para redução significativa do consumo de combustíveis fósseis e consequentemente reduzir a emissão de carbono [27].

#### 2.1.5. Combinação Fotovoltaica-termoelétrica (PV-TEG)

A utilização do espectro total da energia solar pode ser implementada combinando diferentes tecnologias de geração de energia solar, como por exemplo um sistema híbrido fotovoltaico-termoelétrico. Esta combinação pode ser feita de duas formas: a primeira é colocar os módulos termoelétricos na parte traseira do painel fotovoltaico para absorver o calor residual da célula fotovoltaica para geração de energia, normalmente chamado de sistema híbrido PV-TE em cascata. A outra forma, é a combinação híbrida PV-TE de divisão espectral, que utiliza a técnica de divisão espectral para alocar parte da energia solar que não é utilizada pela célula fotovoltaica para o módulo termoelétrico, de modo a produzir energia adicional. O objetivo principal desta combinação híbrida de tecnologias fotovoltaica-termoelétrica é aumentar a eficiência de conversão de energia solar, explorando assim, a capacidade dos módulos termoelétricos de converter energia térmica diretamente em energia elétrica [29]. Várias pesquisas teóricas e experimentais foram realizadas para demonstrar a melhoria de geração de energia e eficiência de conversão a partir da combinação híbrida fotovoltaica-termoelétrica, como é o caso do estudo numérico feito por Gui et al., 2020, que abordaram sobre o desempenho e a falha por fadiga de um sistema híbrido PV-TE concentrado comparando-o com a utilização de módulos termoelétricos segmentado, onde os resultados mostraram que a potência e a eficiência de conversão dos sistemas híbridos PV-TE segmentado podem ser melhoradas em comparação com a combinação híbrida PV-TE uniforme, com o ajuste da taxa de concentração solar da célula para diferentes velocidades do vento [30]. Um outro estudo sobre módulos híbridos fotovoltaico-termoelétrico foi desenvolvido por Khan et al., 2021, onde fizeram uma avaliação experimental e comparativa do desempenho do sistema híbrido PV-TEG para geração de energia, utilizando dez módulos termoelétricos a base de telureto de bismuto, colocados na parte traseira do painel fotovoltaico de silício policristalino de 10W, a fim de recuperar e transformar a energia térmica residual em energia elétrica utilizável, arrefecendo as células fotovoltaicas. Os resultados demonstraram um aumento na potência total de saída do sistema híbrido PV-TEG e melhoria na eficiência de conversão. A temperatura de operação do painel fotovoltaico no sistema híbrido foi reduzida em cerca de 5,5%, de 55°C para 52°C. Devido a redução na temperatura e a adição de energia recuperada pelos módulos termoelétricos, o sistema híbrido PV-TEG utilizado conseguiu gerar cerca de 19% da potência de saída e 17% de eficiência de conversão [18]. Yin et al., 2021, desenvolveram um modelo teórico de um sistema híbrido fotovoltaico-termoelétrico com o foco na otimização e seleção dos

dispositivos, comparando-o com um sistema fotovoltaico concentrado. Deste estudo foi mostrado que o baixo valor da figura de mérito do módulo termoeletrico é determinado apenas pela razão de concentração e pela capacidade do painel fotovoltaico quando a condição de arrefecimento é boa, a resistência de contacto térmico é baixa e a estrutura termoeletrica é apropriada [29]. Muitos estudos sobre conversão de energia solar em energia térmica e elétrica através de processos fototérmicos e fotovoltaicos continuam a ser realizados [18]. A implementação de um sistema solar de cogeração, como é caso do sistema híbrido fotovoltaico-termoeletrico que pode ser utilizada para a absorção de um espectro solar mais ampla, pode resolver não só o problema da temperatura de operação dos painéis fotovoltaicos, mas também melhorar e aumentar a produção geral de energia e o desempenho do sistema híbrido [31] [32].

#### 2.1.6. Combinação Fotovoltaica-termoeletrica-térmica (PV-TEG-T)

Uma das atuais preocupações dos pesquisadores e investigadores é a conservação de energia. Muito trabalho tem sido direcionado para a utilização de fontes de energia renováveis, particularmente energia solar para aquecimento e alimentação elétrica. As energias renováveis são economicamente fiáveis e a sua integração em sistemas de produção de energia é rentável. No entanto, ainda são necessárias melhorias na concepção e exploração de sistemas híbridos para tornar estas soluções tecnológicas mais competitivas e permitir a sua progressão. A incorporação de diferentes geradores de energia num sistema híbrido tem um impacto rentável e favorável na produção de energia, em termos de custo e disponibilidade, bem como um presumível equilíbrio ambiental favorável [26]. Os painéis solares híbridos fotovoltaico e térmico (PV-T) e fotovoltaico e termoeletrico (PV-TE) podem fornecer energia elétrica e térmica através da irradiação solar num único dispositivo. A aplicação maciça destas tecnologias contribuiria para a redução do consumo de energia nos edifícios. A eletricidade produzida pode ser autoconsumida, armazenada em baterias ou vendida à rede. A produção térmica dos painéis híbridos apresenta-se sob a forma de água quente que pode ser utilizada para diferentes fins, como a produção de água quente sanitária (AQS), aquecimento de espaços e a refrigeração por adsorção ou através de uma bomba de calor. Uma forma de aumentar a produção de eletricidade dos painéis PV-T e PV-TE é acoplar as três tecnologias para formar um sistema híbrido PV-TE-T [33]. Várias tentativas foram feitas para integrar os painéis fotovoltaico e térmico com o termoeletrico num sistema híbrido, mas a melhoria deste acoplamento ainda não foi bem desenvolvida, devido à capacidade da construção híbrida de operar a temperaturas mais elevadas mantendo ainda eficiências de conversão elétrica que estão no mesmo nível ou são melhores do que aqueles que operam em temperatura ambiente. A conversão elétrica-

térmica solar direta é preferida porque não possui componentes mecânicos móveis no módulo de geração de energia e pode operar de forma confiável, silenciosa e durante uma longa vida útil. A sua estrutura também é pequena e flexível, tornando-a especialmente apropriada para alguns climas de energia distribuída de pequena escala. As alternativas elétricas-térmicas solares diretos apresentam, portanto, excelentes oportunidades para a produção de energia térmica distribuída em pequena escala, apesar dos desafios significativos com custo e eficiência em aplicações de geração de energia elétrica em grande escala. Muitos cientistas tentaram analiticamente, numericamente e experimentalmente desenvolver conexões entre os três sistemas, a fim de alcançar bons desempenhos [26], como é o caso de Akbar et al., 2021, que desenvolveram um estudo para avaliar o desempenho do sistema híbrido PV-TE-T em condições laboratoriais. O sistema híbrido foi constituído por três componentes principais: um módulo fotovoltaico, um módulo termoeletrico e uma unidade de arrefecimento para reduzir a temperatura da superfície do módulo fotovoltaico e aumentar o desempenho de todo sistema. Para o fluido de arrefecimento foram utilizados quatro fluidos distintos: fluxo de ar natural, água, nano -sílica-água e nano-prata-água. Os resultados dos testes no interior mostraram que a capacidade de produção e a eficiência mais elevada foram obtidas quando foi utilizado o nano-prata-água. E o uso de água, nano-sílica-água e nano-prata-água, reduziu a temperatura do painel fotovoltaico em 1,77 °C, 9,76°C e 13,17°C e a eficiência de conversão aumentou em cerca de 13,09%, 16,17%, 20,68%, respetivamente, em comparação com o arrefecimento de fluxo natural baseado em ar [34]. Um outro estudo foi realizado por Chen Haiping et al. [35], sobre um novo sistema híbrido de baixa concentração fotovoltaica, termoeletrico e térmico. O sistema foi constituído por um concentrador parabólico composto, um painel fotovoltaico de duplo vidro, um conjunto de tubos de calor de microcanais, um módulo termoeletrico e um sistema de aquisição de dados. Os módulos termoeletricos foram colocados na parte fria do conjunto de tubos de calor, atuando como um método de arrefecimento do sistema híbrido de forma a melhorar a eficiência fotovoltaica. Os testes para este trabalho experimental foram realizados no telhado de um edifício em Pequim, em um dia com boas condições ambientais e radiação solar, onde foram analisadas as temperaturas de entrada e saída, potência de saída e a eficiência do sistema híbrido PV-TEG-T com baixa concentração. Os resultados demonstraram um bom desempenho na combinação destas tecnologias, tendo alcançado em média diária 0,23%, 11,8% e 45% de eficiência termoeletrica, fotovoltaica e térmica, respetivamente. O módulo híbrido proposto mostrou-se ser capaz de produzir uma eficiência media diária de cerca de 57% [35]. Kunalgg Sandip Garud et al., 2021, fizeram uma revisão numérica e teórica, sobre os recentes avanços na combinação das tecnologias fotovoltaica, termoeletrica e térmica

com arrefecimento de nano fluidos. Onde foram analisadas a influência da estrutura, o material, a resistência térmica, as condições de funcionamento e as características de desempenho térmico e elétrico de diferentes configurações do sistema híbrido PV-TE-T. Concluindo assim, que o comprimento da perna termoelétrica tem um efeito significativo no desempenho dos sistemas PV-TE-T, onde um maior comprimento da perna termoelétrica aumenta a potência de saída do módulo termoeletrico, mas também aumenta a temperatura do painel fotovoltaico devido à um aumento da resistência térmica, o que é necessário a otimização do comprimento da perna termoelétrica para maximizar o desempenho do sistema híbrido. Por outra, a utilização de nano fluido como meio de arrefecimento do sistema apresenta melhores desempenhos térmicos e elétricos em comparação com os sistemas PV-TE-T com fluidos convencionais. Além disso, o sistema PV-TE-T produz energia elétrica e térmica, o que melhora ainda mais o desempenho global do sistema. Os estudos de investigação sobre sistemas PV-TE-TE com arrefecimento por nanos fluidos são muito limitados, é uma área que precisa de ser mais focada para o futuro desenvolvimento e inovação dos sistemas PV- TE-T. Os materiais de mudança de fase podem também ser integrados em sistemas PV-TE-T sem e com arrefecimento por nano fluido para avaliar e comparar a melhoria do desempenho global do sistema [36]. Os sistemas energéticos baseados em sistemas fotovoltaicos, termoelétricos, térmicos ou híbridos desempenham um papel importante no fornecimento de energia, especialmente para edifícios residenciais e administrativos, escolas, ou mesmo para estufas agrícolas. O consumo de energia nestes edifícios, seja elétrico ou térmico, devido ao aumento do tempo que as pessoas passam no interior, tem crescido como um problema grave, a utilização de equipamentos consumidores de energia para garantir o conforto, ou para garantir uma boa produção para o Setor agrícola. Estes sistemas de energias renováveis apresentam uma alternativa promissora que pode contribuir para este consumo. Embora, a implementação destas tecnologias na infraestrutura energética de um edifício requer um estudo técnico e económico que permita determinar a carga, que se resume na potência elétrica e térmica diária necessária para um edifício a estudar. As análises técnico-económicas comparativas da energia para este tipo de sistema de conversão solar oferecem uma estrutura para abordar elementos como as dimensões do dispositivo, a quantidade de consumíveis e matérias-primas alternativas que podem causar variações nas estimativas de custos. Por isso, uma avaliação geral ajudaria a evitar eventuais constrangimentos na implementação híbrida destas tecnologias, assim um melhor aproveitamento elétrico e térmico deste sistema híbrido será alcançado [26].



# Capítulo 3

## Materiais e Métodos

### 3.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados todos os materiais e métodos usados para a construção da parte experimental que constitui o módulo solar híbrido deste trabalho. Ao longo deste capítulo iremos descrever com mais detalhes as três tecnologias mencionadas no capítulo 2 como chaves da construção experimental deste trabalho de dissertação. Para esta construção começaremos por reunir os materiais de cada componente de modo a atingir os nossos objetivos, que foram os painéis fotovoltaicos, conjunto termoelétrico e o permutador de calor. De realçar que as ideias fundamentais deste projeto se centraram na produção de energia elétrica a partir dos painéis fotovoltaicos e do conjunto termoelétrico, bem como a produção de energia térmica a partir do permutador de calor para aquecimento de um fluido térmico (água).

### 3.2. Apresentação do módulo híbrido PV-TEG-T

Nesta sessão serão apresentadas em detalhes cada material utilizado em cada tecnologia solar, para reconstrução do módulo híbrido, bem suas dimensões e como irão se proceder as medições de modo a encontrar os resultados pretendidos.

#### 3.2.1. Painel fotovoltaico

Neste trabalho um utilizado um painel fotovoltaico em combinação com outras tecnologias e foi adquirido um outro painel fotovoltaico com as mesmas características com o principal objetivo de comparar a eficiência de produção de cada um, ou seja, um dos painéis foi colocado no módulo solar híbrido e o outro a funcionar isoladamente. Assim, estes painéis foram adquiridos no site da SOLECTRO, que é uma loja inglesa de produtos eletrónicos, que existe em muitos países europeus, mas os mesmos foram comprados na loja que se encontra na Espanha e o tempo de envio dos mesmo foi de duas semanas, em que os custos totais destes painéis fotovoltaicos foram de 25,78 euros. Quanto às características destes painéis de silício monocristalinos foram de 165x165 mm de dimensão, com uma tensão nominal de 6 V, uma corrente nominal de 750 mA, tensão de circuito aberto de 7,2 V, corrente de curto-circuito de 850 mA e uma potência de saída de 4,5 W. Na tabela 3.1, são apresentadas todas as características destes painéis.

Tabela 3.1- Característica dos painéis fotovoltaicos.

Descrição	Especificações
Fabricante	<u>OEM</u>
Fornecedor	SOLECTRO
Modelo	D165x165
Dimensões	165x165 [mm]
Tipo de células	Monocristalinas
Tensão nominal	6 [V]
Corrente nominal	750 [mA]
Potencia de saída	4,5 [W]
Tensão de circuito aberto	7,2 [V]
Corrente de curto-circuito	850 [mA]

O valor do rendimento o painel fotovoltaico não estava disponível no site comprado, mas atendendo ao tipo de célula utilizada, células de silício monocristalino, acredita-se que esteja no intervalo de 12 a 20% de rendimento. As ligações elétricas dos painéis não vinham feitas a partir da fábrica, por isso, procedeu-se à soldagem das mesmas, com os fios condutores, em que o vermelho serviu para representar o polo positivo e o preto para o polo negativo, de cada painel fotovoltaico utilizado, como é mostrado na figura 3.1.

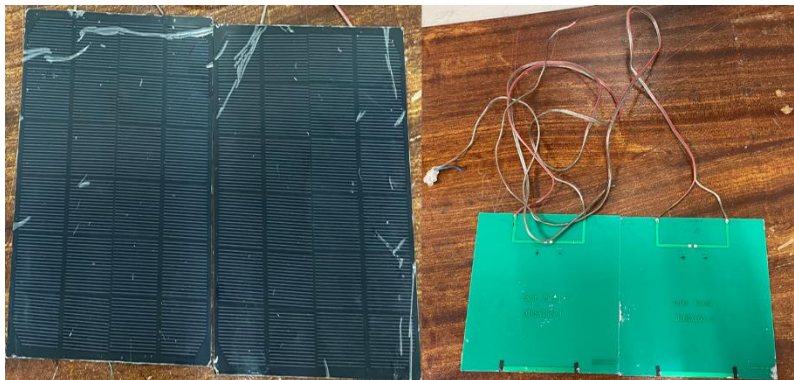


Figura 3 2 - Painéis fotovoltaicos adquiridos.

### 3.2.2. Células termoelétricas

Quanto às células termoelétricas utilizadas neste trabalho, já foram utilizadas [37] em outros trabalhos, atendendo que estas se encontravam em boas condições do seu uso, houve a necessidade de serem recuperadas e usadas para este trabalho também. Desta forma, as células utilizadas foram as TEC1- 12708 aplicadas às células TEG, que são células que produzem potência elétrica consoante as temperaturas que lhes são aplicadas em cada uma das duas faces do módulo. Portanto as células TECs foram escolhidas para este trabalho porque são melhores para aplicações em baixa temperaturas ( $< 120^{\circ}\text{C}$ ). Desta forma, foram utilizadas 16 células de Peltier com dimensões quadradas de 40 mm para cada lado. As mesmas foram divididas em quatro setores ligados em paralelo, em que cada setor possui quatro células ligadas em série. Para a ligação destes quatro setores, foram usados 8 fios condutores que saem do centro do módulo para as caixas de ligações situadas fora da área termoelétrica, para facilitar as medições das grandezas elétricas produzidas pelas células termoelétricas. Deste modo, para encaixar perfeitamente as células termoelétrica, de modo a impedir espaços vazios entre elas, foram colocados pequenos pedaços de cortiça (que servem também como isolante térmico) de 2mm de espessura, com o propósito de reduzir a transferência de calor por convecção entre as faces quentes e frias das células. De realçar que as dimensões destas células termoelétricas foram adquiridas de modo a servir com as dimensões do painel fotovoltaico, que também é um dos componentes que faz parte da construção deste módulo solar híbrido, como já foi referido anteriormente. A tabela 3.2, apresenta as características das células utilizadas, de uma forma mais compreensiva.

Tabela 3.2- Características das células termoelétricas TC1-12708.

Descrição	Especificação
Fabricante	TMOEC
Fornecedor	DYMORE
Modelo	TC1-12708
Dimensões	40x40x3,5
Material externo	[Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ]
Pares termoelétricos	127
Tensão nominal	15,4 [V]
Corrente nominal	8,5 [A]
$Q_{cmax}$	74 [W]
$\Delta T_{max}$	67 [°C]
Temperatura nominal	138 [°C]
Resistência elétrica interna	1,3 a 1,7 [ $\Omega$ ]
Comprimento aproximado dos condutores	250 [mm]

Na figura 2.3 estão representadas o conjunto das 16 células termoeletricas utilizadas na parte experimental deste trabalho.

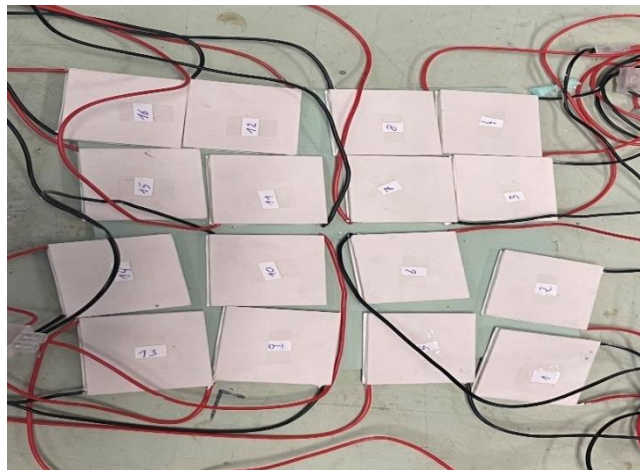


Figura 3 3 - Representação das células de termoeletricas TC1-12708.

### 3.2.3. Coletor térmico

Para a conversão da energia térmica, foi utilizado um permutador de calor que já usado em outros trabalhos [37], por onde vai ser aquecido o fluido térmico a ser usado. Para a construção do mesmo foram utilizadas duas placas de alumínio com condutividade térmica de 145-165 W/m.K, esta escolha foi baseada em comparação com a condutividade térmica que outros materiais de alumínio possuem, tendo mostrado assim, que o alumínio da marca 6082 T451, possuía melhor condutividade térmica em relação aos outros tipo, como se pode observar na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Comparações dos vários tipos de alumínio.

Propriedade	Liga 5083 H1111	Liga 2017 T451	Liga 6082 T451	Liga 7075 T651
Carga de ruptura [MPa]	293	430	275	525
Limite elástico [MPa]	153	285	240	565
Dureza Brinell HB	68-75	105-110	100	130-150
Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	2,70	2,70	2,78	2,83
Modulo de elasticidade [MPa]	71 000	72 000	69 000	72 000
Condutividade elétrica [m/Ω. mm <sup>2</sup> ]	16-18	49-53	40-45	56-66
Condutividade térmica [W/m.K]	110-130	125-140	145-165	130

Para a reconstrução deste permutador de calor foi preciso duas placas de alumínio com dimensão de 170x170x10 mm. Antes da maquinação destas placas, foi feito uma simulação do desenho do permutador no solidworks para se ter uma ideia clara da sua forma. Desta forma, prosseguiu-se com a maquinação das placas, onde depois foram feitas duas roscas M12 para cada placa para encaixar os tubos de entrada e saída da água do permutador de calor, que têm 12 mm de diâmetro. Também foram feitas 8 roscas M3 em cada canto das placas para unir as mesmas com parafusos. Na figura 3.3 esta representada as duas placas finalizadas.



Figura 3 4 - Placas de alumínios já feitas para construção do permutador de calor

Com o propósito de orientar o percurso interno do fluido dentro do permutador, foi necessário fazer uma estanquicidade interna com silicone cola e veda branco da marca Pecflix indicada para este tipo de aplicações. Este permutador de calor teve volume interno onde circula o fluido de trabalho de 0,1285 litros. E por fim, foi feito um furo de 1 mm de diâmetro em cada um dos tubos para a colocação dos termopares do tipo T, para medir as temperaturas de entrada e saída da água do permutador.

#### 3.2.4. Módulo solar PV-TEG-T proposto

Depois de reunida as três componentes que fazem a combinação do sistema híbrido, passou-se a fase de juntar os três componentes de forma a obter o módulo solar híbrido. Mas antes da montagem dos mesmos foi feito um suporte que também serviu como uma isolamento térmica para obter um melhor aproveitamento da radiação solar, e assim assegurar que toda radiação solar recebida pelo painel fotovoltaico, passe para o conjunto termoeletrico que se encontra na parte traseira do painel fotovoltaico, e por fim para o permutador de calor em forma de calor onde acontece a remoção do mesmo para aquecimento do fluido térmico (neste caso, foi utilizada a água da rede). O isolamento térmico construído, foi uma placa de material poliestireno extrudido, que possuía um

valor de condutividade térmica de  $0,36 \text{ W/m.K}$ ,  $350 \times 265 \times 62 \text{ mm}$  de dimensão, com a dupla função de não só isolar e combater as trocas de calor bem como ter a função de suporte de todo o módulo solar. Na figura 3.4 estão representadas a estrutura e as dimensões do isolamento no lado esquerdo e no lado direito o módulo já construído, onde se pode observar todos os recortes dos componentes a utilizar, a região central onde será encaixado o permutador de calor, as células termoelétricas e bem como o painel fotovoltaico, nas laterais encontram-se os quadrados que serviram de caixas de ligações auxiliares dos fios condutores das células termoelétricas e do painel fotovoltaico.

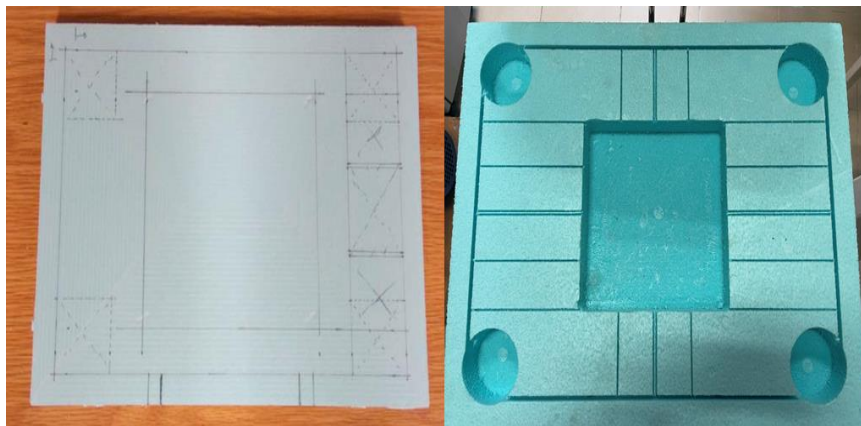


Figura 3 5 - Placa de isolamento para o modulo solar híbrido.

Todo o recorte deste isolamento foi feito no laboratório do FabLab, como é mostrado na figura 3.5.

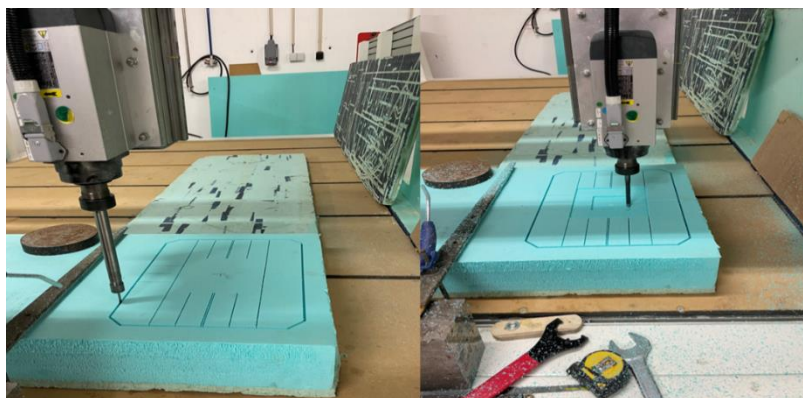


Figura 3 6 - Recortes para a construção do isolamento feito no FabLab.

Já com o suporte construído, deu-se então o início da montagem dos componentes para então termos o nosso módulo híbrido construído, primeiro foi colocado o permutador de calor na caixa, com os tubos de entrada e saída da água para fora, como mostrado na figura 3.6.

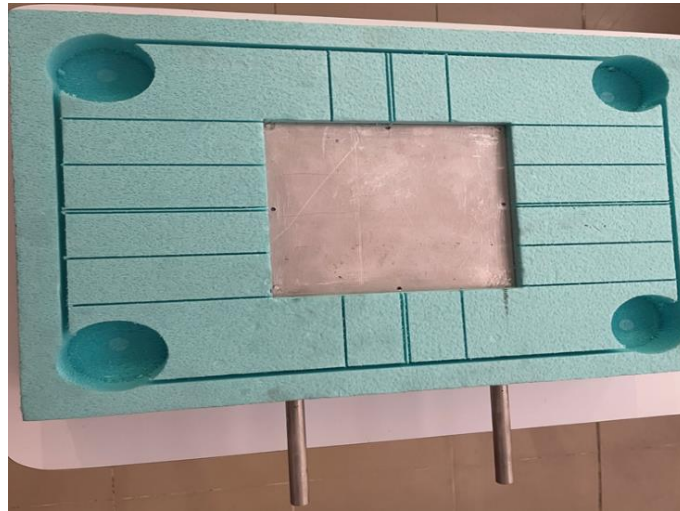


Figura 3 7 - Caixa de isolamento já com o permutador de calor.

Para ter uma excelente condutividade térmica do calor entre o permutador de calor e as células termoelétricas, foi colocado por cima do permutador uma massa térmica (MX-2 thermal compound) da marca ARCTIC. Esta massa térmica esta representada na figura 3.7 onde podemos observar no lado esquerdo o tubo de massa térmica e no lado direito a massa já colocada por cima do permutado de calor.



Figura 3 8 - Massa térmica utilizada.

Depois da montagem do permutador de calor e da massa térmica, passamos para fase de colocar as células termoelétricas em contacto com o permutador de calor e a massa térmica. Assim, a parte fria das células foi colocada em contacto com o permutador de calor e parte quente será colocada em contacto com a parte traseira do painel fotovoltaico, e os fios condutores de cada célula foram ligados nas caixas externas da placa do isolamento térmico como se pode ver na figura 3.8.

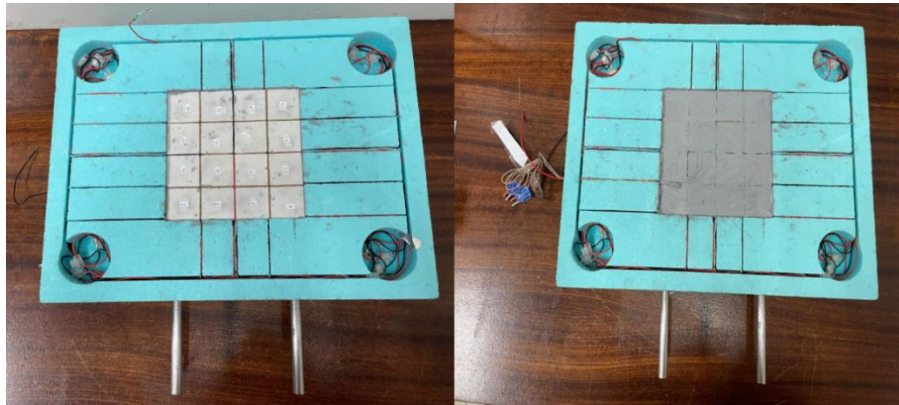


Figura 3 9 - Colocação das células termoelétricas.

De seguida foi colocada mais uma quantidade de massa térmica por cima das células termoelétricas, isto é, na parte quente das mesmas que estarão em contacto com a parte traseira do painel fotovoltaico, como mostrado no lado direito da figura 3.8. Por fim, foi colocado o painel fotovoltaico por cima das células termoelétricas como se pode ver na figura 3.9.

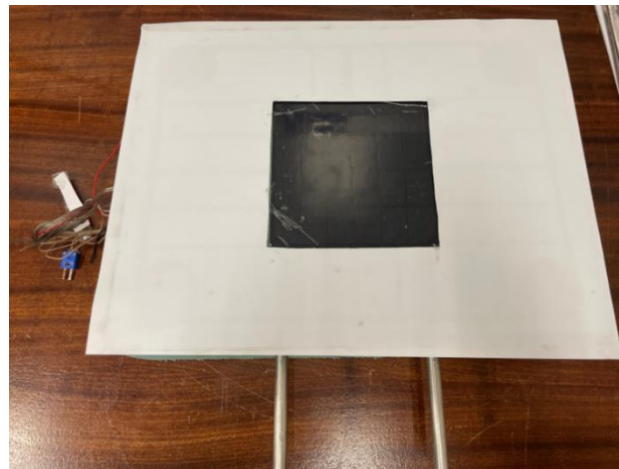


Figura 3 10 - Colocação do painel fotovoltaico.

O desenho do isolamento térmico utilizado foi todo feito no software Solidworks antes do seu recorte. Durante a montagem dos componentes que fazem parte deste módulo solar híbrido no seu suporte, também foram se colocando os cinco termopares do tipo T, utilizados para medir as temperaturas de cada componente, mostrado na figura 3.10. Assim, foi colocado um termopar entre a parte fria das células termoelétricas e o permutador de calor para medir a temperatura de trabalho entre estes dois componentes, o segundo termopar foi colocado entre a parte quente das células termoelétricas e a parte traseira do painel fotovoltaico de modo a saber a temperatura

que passa por eles, o terceiro e quarto termopar foram colocados nos tubos de entrada e saída de água do permutador de calor para saber a temperatura de entrada e saída do fluido de trabalho. Por fim, o quinto termopar foi colocado na parte frontal do painel fotovoltaico de modo a saber a temperatura que o painel recebe a partir da radiação solar.

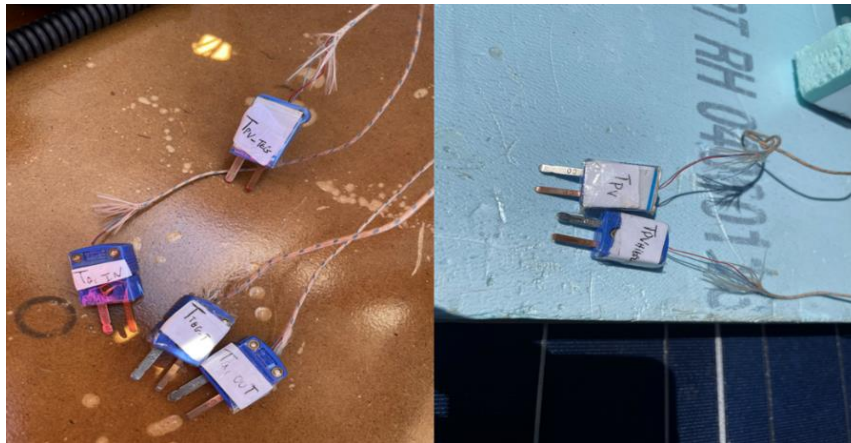


Figura 3 11 - Termopares do tipo T, utilizado para medir as temperaturas dos módulos.

Mas no total, foram utilizados seis termopares neste trabalho, em que o sexto termopar foi utilizado para medir a temperatura do painel fotovoltaico isolado, porque para além de vermos a produção das três componentes que constituem este modulo solar híbrido, também queremos compará-lo com um painel fotovoltaico isolado em termos de rendimento ou produção de energia elétrica. Estes termopares são constituídos por dois metais diferentes, um condutor positivo puramente cobre (Cu) e outro condutor negativo mistura de 45% de níquel (Ni) com 55% de cobre. E para este tipo de termopares as temperaturas de utilização variam de  $-270^{\circ}\text{C}$  a  $370^{\circ}\text{C}$ , empregando assim a faixa de temperatura do módulo solar híbrido reconstruído.

### 3.3. Apresentação da restante instalação experimental

Depois da construção do módulo solar híbrido, foi também necessário reunir o resto dos equipamentos que fazem parte desta instalação experimental. Desta forma, foi utilizado uma bancada, onde foi colocado todos os equipamentos de medição bem como os módulos solares utilizados. Para os equipamentos de medição, no início foi pensado em usar um banho termostático da marca HUBER, modelo INISTAT CC, para medir e manter a temperatura da água constante a  $14^{\circ}\text{C}$ , mas durante os primeiros ensaios feitos este equipamento avariou e tivemos de trocar o método de circulação do fluido de trabalho de entrada e saída do permutador de calor, por isso, optou-se na utilização da água da rede com a temperatura constante, assim, foi usado uma mangueira onde

percorria a água da rede para o módulo através da mangueira para um copo que tinha uma entrada e duas saídas ( uma saída da água entrava para o módulo solar híbrido através do tubo de entrada do permutador de calor e a outra saída de água para um reservatório), este esquema pode ser visualizado na figura 3.11.



Figura 3 12 - Bancada de ensaio.

Outros equipamentos também utilizados neste trabalho foram dois multímetros com uma incerteza associada à leitura de 0,02 mA e de 0,001 V, no qual um foi usado como voltímetro e o outro como amperímetro, desta forma foi possível medir e registrar as diferentes tensões e correntes que fluem no módulo solar híbrido (painel fotovoltaico e módulo termoeletrico), assim como no painel fotovoltaico isolado, representado na figura 3.12. Durante a medição das grandezas, foram feitas trocas entre os dois circuitos elétricos que fazem parte deste trabalho híbrido.

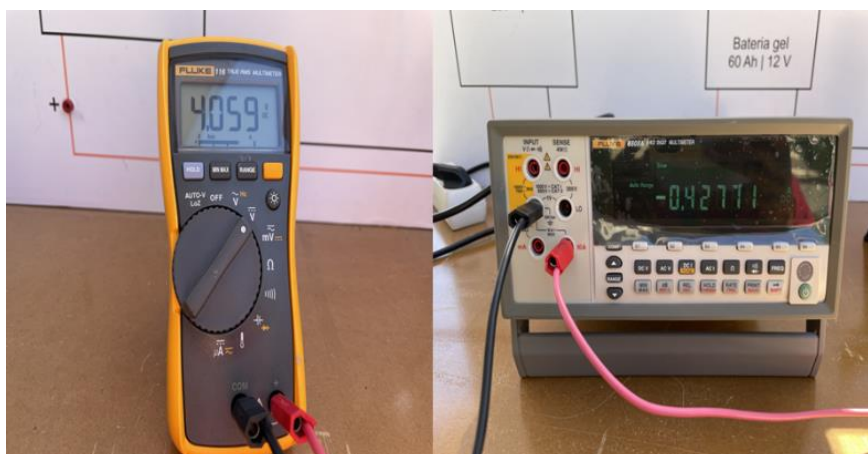


Figura 3 13 - Voltímetro (lado esquerdo) e amperímetro (lado direito) usado para medição das grandezas elétricas.

Também estão representas na figura 3.14 duas placas para montagem dos circuitos elétricos para o módulo fotovoltaico e termoeétrico, onde foram colocadas as cargas ou resistências para os ensaios, como serão mostrados na próxima sessão o circuito feito no Multisim.

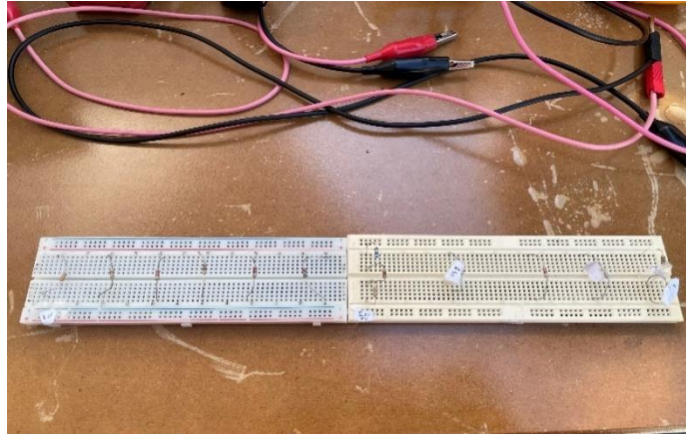


Figura 3 14 - Placas utilizadas para montagem do circuito elétrico (fotovoltaico e termoeétrico).

Também foi utilizado um datalogger da marca PCE Instrumentes representado na figura 3.14, que permite a leitura e registo dos valores de temperatura dos módulos híbrido e isolado, a partir dos termopares do tipo T que foram colocados nos módulos. Desta forma, foram registadas as temperatura das partes frontais dos dois painéis fotovoltaicos híbrido ( $T_{PV\_H}$ ) e isolado ( $T_{PV\_I}$ ), temperatura da parte traseira do painel fotovoltaico e parte quente das células termoeétricas ( $T_{PVH\_TE}$ ), temperatura da parte fria das células termoeétricas e do permutador de calor ( $T_{TE\_T}$ ) e as temperaturas de entrada e saída de água do permutador de calor ( $T_{a\_In}$  e  $T_{a\_Out}$ ), isto é, para o módulo solar híbrido. Para a medição da intensidade da radiação solar que incidia em cada módulo fotovoltaico, no mesmo instante de tempo, foi utilizado um equipamento que se chama solarímetro da marca AMPROBE na unidade de  $W/m^2$ , que permite uma leitura de até  $2000 W/m^2$ , como mostrado na figura 3.15 lado direto.



Figura 3 15 - Solarímetro e datalogger.

### 3.4. Grandezas a medir

Depois de reunir todos os equipamentos de medição necessário, passamos agora a saber os tipos de grandezas a medir, em que o foco passa-se as grandezas elétricas tensões e correntes que percorrem nos circuitos fotovoltaicos e termoelétricos, mas também dar atenção as outras grandezas que complementam o objetivo deste trabalho, como é o caso da radiação incidente nos painéis fotovoltaicos, os valores das temperaturas anteriormente mencionadas que são medidas através dos termopares colocados nos módulos em que os seus valores são lidos e registados no datalogger, é de realçar que os valores são lidos na unidade de graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), embora a unidade de temperatura utilizada no sistema internacional (SI) seja o kelvin (K). A tabela 3.4 apresenta os tipos de grandeza a medir, bem como a sua descrição.

Tabela 3 4 - Grandezas medidas em cada ensaio realizado.

Tipo de grandeza	Descrição	Símbolo
Elétricas	Tensão no painel fotovoltaico Híbrido.	$V_{pvH}$
	Corrente no painel fotovoltaico Híbrido	$I_{pvH}$
	Tensão no painel fotovoltaico isolado.	$V_{pvi}$
	Corrente no painel fotovoltaico isolado.	$I_{pvi}$
	Tensão no modulo termoeletrico.	$V_{TEGH}$
	Corrente no modulo termoeletrico.	$I_{TEGH}$
Temperatura	Temperatura na superfície do painel fotovoltaico híbrido.	$T_{pvH}$
	Temperatura na superfície do painel fotovoltaico isolado.	$T_{pvi}$
	Temperatura na parte traseira do painel fotovoltaico e a parte quente do conjunto termoeletrico.	$T_{pvH\_TEG}$
	Temperatura na parte fria do conjunto termoeletrico e do permutador de calor.	$T_{TEG\_T}$
	Temperatura de entrada da água no permutador de calor.	$T_{aIn}$
	Temperatura de saída da água no permutador de calor.	$T_{aOut}$
	Mássica	Caudal da água no permutador de calor.
Radiação	Intensidade da radiação solar incidente.	$E_e$

### 3.5. Metodologia de ensaio

Durante a realização deste trabalho, foi definido os tipos de ensaios a se realizar unicamente com a luz solar, onde se decidiu que seriam ensaios em vazio (sem cargas elétricas) e ensaios com cargas elétricas. Antes do início dos ensaios, fizemos a verificação de todo modulo solar híbrido para confirmar o funcionamento de todos os componentes que constituem o módulo. Estes ensaios tinha uma duração elevada que obrigava a presença no local, para anotar os valores das grandezas a serem medidas,

temperaturas dos módulos híbridos e isolados, caudal da água, intensidade da radiação solar antes e depois de cada medição feita , tensões, correntes, bem como registar o tempo do inicio de cada medição, assim como as trocas dos cabos colocados nos painéis e placas utilizadas e a orientação da bancada onde estavam colocados todo o material que fizeram parte deste trabalho experimental na posição correta do sol, pois os ensaios realizados não foram testes fixos, toda esta montagem esta representada na figura 3.11, e os ensaios foram todos realizados no silo auto da Faculdade de Engenharia, UBI.

### 3.5.1. Esquemas elétricos

Como já foi referido anteriormente, que foi necessário a realização dos esquemas elétricos na plataforma NI Multisim 14.3 para perceber os tipos de ligações a ser feito no ensaio com cargas. Na figura 3.15 estão representadas todas a ligações feitas em série das células termoeletrico.

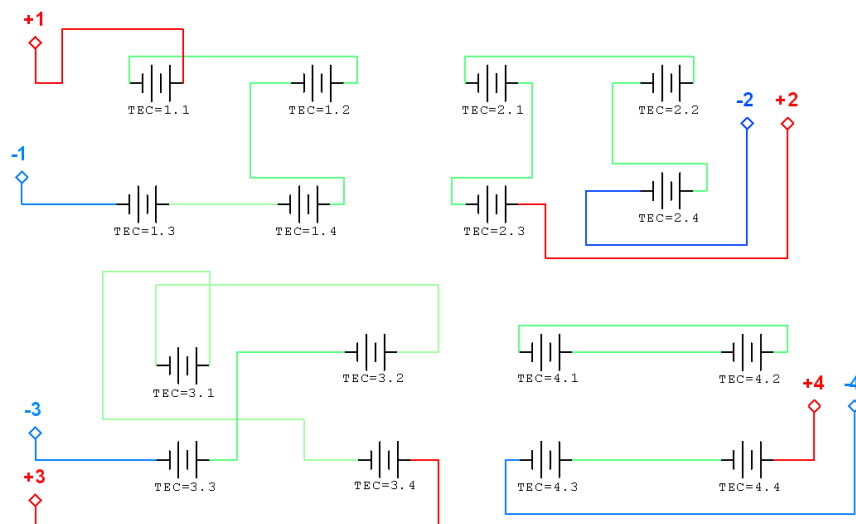


Figura 3 16 - Esquema elétrico do módulo termoeletrico, com ligações em série em cada setor.

Quanto a disposição ou numeração das células foi feita da seguinte forma, para o setor n.º 1 da célula TEC 1.1 a 1.4, setor n.º 2 da célula TEC 2.1 a 2.4, setor n.º 3 da célula TEC 3.1 a 3.4 e setor da célula TEC 4.1 a 4.4, onde os condutores vermelhos e azuis representam os polos positivos e negativos respetivamente, como mostrado na figura 3.16. Para simplificar as ligações feitas na figura 3.16, o circuito foi reduzido por setor ligados em paralelo representado na figura 3.17. Desta forma, todo o conjunto das células termoeletricas pode ser representado como um circuito DC, fonte de corrente contínua. De modo a finalizar a montagem dos circuitos elétricos utilizados para os ensaios destes trabalhos na figura 3.18 estão representados os circuitos do conjunto termoeletrico e fotovoltaico. Estes esquemas serviram para as medições dos parâmetros de desempenho e da curva caraterística corrente-tensão do módulo termoeletrico e fotovoltaico.

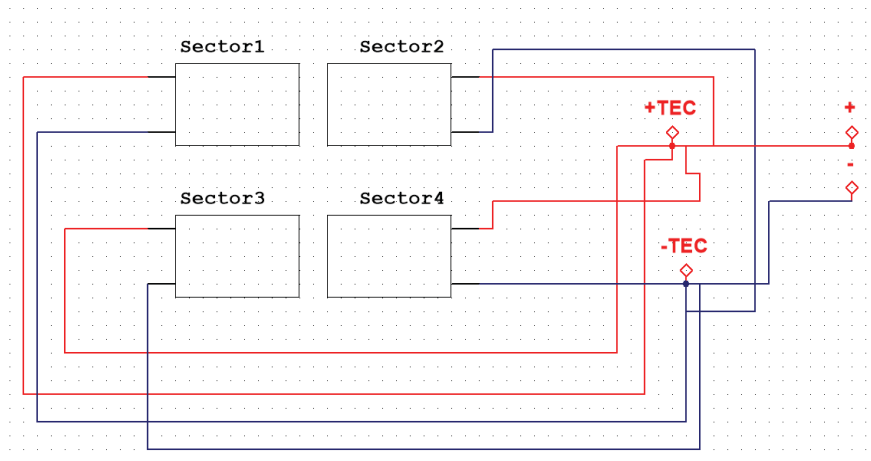


Figura 3 17 - Esquemas de ligações por setor das células termelétricas.

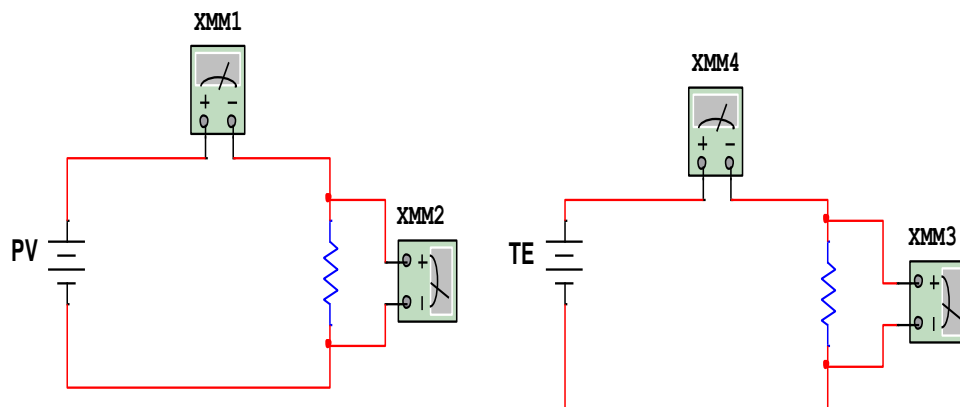


Figura 3 18 - Circuito elétrico para o módulo fotovoltaico e termoeletrico

Para o circuito térmico, o principal objetivo foi garantir uma boa isolamento térmica na parte da instalação térmica (permutador de calor), isolamento esta que serviu também como suporte para todo modulo solar híbrido construído. Na sessão 3.4, foram descritas todas as diferentes grandezas a serem medidas durante os ensaios, sejam elas elétricas ou não, nesta nova sessão, resta-nos mencionar as diferentes grandezas a serem calculadas a partir das grandezas medidas anteriormente. Para o cálculo destas grandezas foram feitas operações aritméticas, para calcular os valores das potências elétricas e não elétricas, temperaturas e o rendimento do módulo solar híbrido e do painel fotovoltaico isolado, que é o fator determinante do nosso trabalho. Desta forma, foram primeiramente calculadas as potências elétricas do módulo solar híbrido que representam dois terços das energias deste módulo, isto é, na equação 3.1 temos a potência produzida pelo painel fotovoltaico do módulo solar híbrido, a potência produzida pelo conjunto das células termoeletricas representada na equação 3.2 e, por

fim, a potência térmica produzida pelo permutador de calor a partir da diferença de temperatura de entrada e saída da água do mesmo (estas diferenças de temperaturas são calculadas na equação 3.3, descrito na equação 3.4.

$$P_{pvH} = V_{pvH} \times I_{pvH} \quad (3.1)$$

$$P_{TEG\_H} = V_{TEGH} \times I_{TEGH} \quad (3.2)$$

$$\Delta T_a = T_{aOut} - T_{aIn} \quad (3.3)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T_a \quad (3.4)$$

A partir da equação 3.5 torna-se possível calcular a potência total ou de saída produzida pelo modulo solar híbrido através do somatório de todas as potências unitárias acima calculadas.

$$P_{outH} = P_{pvH} + P_{TEG\_H} + \dot{Q} \quad (3.5)$$

Depois do cálculo das grandezas do modulo solar híbrido, foi também indispensável o cálculo das grandezas do painel fotovoltaico isolado, onde tivemos apenas de calcular o valor da potencia de saída representado na equação 3.6, sendo o valor da área  $A_{pV}$  o mesmo, porque os painéis fotovoltaicos tinham as mesmas dimensões e a radiação incidente  $E_e$  nos painéis fotovoltaicos, e as medições desta grandeza eram no mesmo instante.

$$P_{pVI-out} = V_{pVI} \times I_{pVI} \quad (3.6)$$

Por fim, resta-nos apenas calcular o rendimento do módulo, que a razão entre a potência fornecida ( $P_{out}$ ) e a potência consumida. A potência consumida ( $P_{in}$ ) pode ser obtida a partir da expressão representa na equação 3.7.

$$P_{in} = E_e \times A_{pV} \quad (3.7)$$

Onde  $E_e$  representa a radiação incidente sob a área dos painéis fotovoltaicos de ambos módulos e  $A_{pV}$  a área constante deste mesmo painel que possui um valor constante de  $0,027225 \text{ m}^2$ . Assim, a expressão para calcular o rendimento do módulo está representada na equação 3.8.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% \quad (3.8)$$

### 3.6. Nota conclusiva

Neste capítulo, foram descritos todos os materiais usados para a concretização da parte experimental, bem como os métodos adotados para a realização do mesmo, tendo em conta a montagem do módulo solar híbrido utilizado, as diferentes grandezas medidas, sejam elas elétricas ou não, as grandezas a calcular depois da realização dos ensaios, assim como os diferentes tipos de ensaios a serem feitos. No próximo capítulo serão apresentados as análises dos ensaios realizados, em forma de tabelas e gráficos.

## Capítulo 4

### Discussão dos resultados

#### 4.1. Introdução

Neste capítulo vai ser apresentado a discussão geral dos resultados de uma forma detalhada, os tipos de ensaios realizados, mencionado no capítulo anterior. Assim, neste capítulo irão constar todas as configurações testadas em forma de tabelas e gráficos de dispersão.

#### 4.2. Descrição dos ensaios realizados

Os ensaios realizados em vários dias diferentes com o principal objetivo de aumentar a eficiente de produção dos módulos, em termo de energia elétrica, foram divididos apenas em dois tipos de ensaio como já foi referido anteriormente, que serão ensaios em vazio, sem qualquer carga no circuito fotovoltaico ou termoeletrico e ensaios com cargas elétricas, conectadas tanto no circuito do painel fotovoltaico como no circuito termoeletrico, feitos no silo auto da Faculdade de Engenharia da UBI e com predominância da luz natural e ausência de nuvens. A localização da bancada onde contia toda instalação dos materiais utilizados foi determinada tendo em conta os fatores de ausência de sombreamento por infraestruturas ou ausência de circulação de automóveis

naquele local. A montagem da bancada dos ensaios está representada na figura 3.11, em que no início da realização dos mesmos a temperatura de água estaria definida com o valor de 14 graus imposta no banho termostático, mas devido alguns imprevistos surgidos com o banho termostático, foi alterado este método da utilização do fluido, tendo se optado por usar a água da rede para circular no permutador de calor. O valor do caudal de água a circular no permutador de calor manteve-se igual 6,0 L/min, como foi definido desde o início, ou seja, 1000 ml/10min, que era medido com ajuda de um copo apropriado. E a intensidade da radiação solar foi medida com o solarímetro.

#### **4.2.1. Ensaio em vazio**

Neste ensaio realizado sob a predominância da radiação solar natural, não contou com nenhuma carga aplicada aos circuitos elétricos fotovoltaico e termoelétrico. De relembrar também que os painéis fotovoltaicos utilizados possuem nas suas características uma potência nominal de 4,5 W, valor este obtido mediante condições padrão, entre as quais se referem 25 °C para a temperatura das células fotovoltaicas e uma radiação incidente fixa de valor igual a 1000 W/m<sup>2</sup>. No entanto para as medições dos ensaios deste trabalho haverá uma variação da radiação solar e conseqüentemente da temperatura que atinge os painéis fotovoltaicos pelo facto de serem ensaios feitos numa luz não controlada. Os valores medidos para este tipo de ensaios, referiam-se às características de corrente de curto-circuito que é uma corrente máxima obtida sob determinadas condições de radiação solar e temperatura, isto quando o valor de tensão é nula ( $V = 0V$ ), e de tensão de circuito aberto que é a tensão máxima obtida nos terminais de uma célula fotovoltaica ou termoelétrica, também sob condições de temperatura e radiação solar. Estes ensaios foram realizados com um intervalo de hora, devido às várias grandezas a serem medidas e também a constante alteração da radiação incidente e da temperatura ambiente que atingia os módulos, forma a obter valores credíveis.

#### **4.2.2. Ensaio com cargas**

Para os ensaios realizados com cargas elétricas, que foram representadas por resistências elétricas de vários valores ôhmicos, dos mais baixos, médios e altos valores escolhidos. Neste tipo de ensaio procuramos determinar os pontos máximos de corrente e tensão e potência produzida pelas células fotovoltaicas e termoelétricas e que permitem obter também as curvas características destas grandezas elétricas por estes módulos solares.

### **4.2.3. Apresentação de tabelas dos ensaios realizados**

Nesta sessão vamos apresentar o resumo das tabelas com os valores médios obtidos em cada dia que foram realizadas as medições, para os diferentes ensaios realizados. Desta forma, as medições eram realizadas, no início registava-se o tempo, seguida da medição do caudal de água que passava pelo permutador de calor antes e depois de medir todas as grandezas elétricas e não elétricas, este processo acontecia também com a medição da radiação solar que atinge os painéis fotovoltaicos. De lembrar que para o painel fotovoltaico isolado apenas eram medidos a radiação solar antes e depois, a temperatura que atingia o painel, bem como as duas grandezas elétricas corrente e tensão de forma a ver a potência produzida por este módulo. Mas o principal objetivo de utilizar dois painéis fotovoltaicos neste trabalho, em que um trabalhava isoladamente e o outro com a cogeração de outras tecnologias solares, foi para comparar a eficiência elétrica dos painéis fotovoltaicos. Como apenas cerca de 20% da radiação solar que atinge um painel fotovoltaico é convertido em energia elétrica, e cerca de 80% desta radiação é desperdiçada em calor não aproveitado, facto este que tem chamado atenção de muitos pesquisadores e investigadores, na procura de estratégias de melhorar a produção dos painéis fotovoltaicos e que faz parte de um dos objetivos específicos deste trabalho experimental. No entanto para a combinação híbrida deste trabalho o processo de medição foi o mesmo, com a diferença de que havia mais grandezas a serem medidas pelo simples facto de haver a combinação das outras tecnologias e estas possuem grandezas que também precisavam ser medidas e calculadas com o intuito de ver a produção de cada tecnologia e em geral de ver a eficiência do módulo solar híbrido. A seguir são apresentadas todas as tabelas com os valores médios medidos em cada ensaio, que fazem parte dos tipos de ensaios acima definidos. Assim passamos apresentar os primeiros dados dos valores médios das grandezas medidas no primeiro ensaio com uma temperatura imposta no banho termostático e os mesmos estão representados na tabela 4.2. Para cada tabela apresentada nesta secção consta os valores das cargas utilizadas neste ensaio referente ao ensaio com aplicações de resistências bem como os ensaios em curto-circuito e circuito aberto (ensaio em vazio). A partir do segundo ensaio a água utilizada já não foi imposta no banho termostático. Na tabela 4.1 constam as respetivas condições de ensaio para cada ensaio realizado.

Tabela 4 1 - Tabela com os ensaios realizados com as respectivas condições de ensaio.

Ensaio realizado	Cargas PV [ $\Omega$ ]	Ta_in (permutador de calor)	Cargas TE [ $\Omega$ ]
Ensaio 1	0; 5,6; 6,5; 8,2; 9,1; 56,6; 101; $\infty$	14 °C (banho termostático)	-
Ensaio 2	0; 5,6; 6,5; 8,2; 9,1; 12,1; 14,7; 17,3; 21,9; 22,9; 23,3; 56,6; 101; $\infty$	17 °C (rede)	-
Ensaio 3	0; 9,1; 21,9 ; 22,9 ; 23,3; 56,6; 101; $\infty$	27 °C (rede)	0 3,5 10,2 12,1 15,2 22,9 $\infty$
Ensaio 4	0; 9,1; 21,9 ; 22,9 ; 23,3; 56,6; 101; $\infty$	25 °C (rede)	0 3,5 10,2 12,1 15,2 22,9 $\infty$
Ensaio 5	0; 9,1; 21,9 ; 22,9 ; 23,3; 56,6; 101; $\infty$	25 °C (rede)	0 3,5 10,2 12,1 15,2 22,9 $\infty$
Ensaio 6	0; 9,1; 21,9 ; 22,9 ; 23,3; 56,6; 101; $\infty$	24 °C (rede)	0 3,5 10,2 12,1 15,2 22,9 $\infty$
Ensaio 7	0; 9,1; 21,9 ; 22,9 ; 23,3; 56,6; 101; $\infty$	24 °C (rede)	0 3,5 10,2 12,1 15,2 22,9 $\infty$

Tabela 4 2 - Tabela dos valores médios das grandezas medidas no primeiro ensaio a uma temperatura imposta de 14°C no banho termostático.

$R_{pv}$ [ $\Omega$ ]	$T_a$ [°C]	$T_{aIn_m}$ [°C]	$T_{aOut_m}$ [°C]	$T_{TE-T_m}$ [°C]	$T_{pvH-TE_m}$ [°C]	$T_{pvl_m}$ [°C]	$T_{pvH_m}$ [°C]	$Rad_m$ [W/m <sup>2</sup> ]	$V_{pvl_m}$ [V]	$I_{pvl_m}$ [A]	$V_{pvH_m}$ [V]	$I_{pvH_m}$ [A]	$P_{pvl_m}$ [W]	$P_{pvH_m}$ [W]
0	14	17	22	22	26	62	34	1105	0	0,344	0	0,392	0	0
5,6	14	17	22	22	26	62	34	1105	1,940	0,343	2,190	0,385	0,665	0,844
6,5	14	17	22	22	26	62	34	1105	2,379	0,340	2,700	0,386	0,810	1,042
8,2	14	17	22	22	26	62	34	1105	3,054	0,341	3,548	0,383	1,041	1,357
9,1	14	17	22	22	26	62	34	1105	3,114	0,339	3,518	0,382	1,056	1,345
21,9	14	17	22	22	26	62	34	1105	5,617	0,262	6,326	0,297	1,472	1,879
56,6	14	17	22	22	26	62	34	1105	6,104	0,117	7,02	0,129	0,717	0,906
101	14	17	22	22	26	62	34	1105	6,281	0,064	7,158	0,074	0,401	0,527
$\infty$	14	17	22	22	26	62	34	105	6,42	0	7,34	0	0	0



Tabela 4 3 - Tabela dos valores médios das grandezas medidas no segundo ensaio com uso da água da rede.

$R_{pv}$ [ $\Omega$ ]	$T_{aIn_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{aOut_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvi_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvH_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$Rad_m$ [ $W/m^2$ ]	$V_{pvi_m}$ [V]	$I_{pvi_m}$ [A]	$V_{pvH_m}$ [V]	$I_{pvH_m}$ [A]	$P_{pvi_m}$ [W]	$P_{pvH_m}$ [W]
0	17	21	33	23	1116	0	0,359	0	0,432	0	0
5,6	17	21	33	23	1116	1,58	0,287	2,665	0,343	0,453	0,913
6,5	17	21	33	23	1116	2,135	0,372	3,059	0,471	0,793	1,439
8,2	17	21	33	23	1116	2,265	0,372	2,89	0,414	0,842	1,195
9,1	17	21	33	23	1116	2,43	0,326	3,71	0,449	0,791	1,666
12,1	17	21	33	23	1116	2,945	0,344	3,095	0,352	1,012	1,088
14,7	17	21	33	23	1116	2,715	0,375	2,725	0,378	1,018	1,030
17,3	17	21	33	23	1116	3,355	0,373	3,11	0,358	1,251	1,113
21,9	17	21	33	23	1116	4,905	0,325	5,075	0,347	1,592	1,759
22,9	17	21	33	23	1116	3,345	0,356	4,32	0,42	1,189	1,814
23,3	17	21	33	23	1116	4,89	0,339	5,25	0,393	1,660	2,065
56,6	17	21	33	23	1116	6,44	0,206	6,305	0,193	1,327	1,214
101	17	21	33	23	1116	6,605	0,182	6,365	0,165	1,202	1,047
$\infty$	17	21	33	23	1116	6,97	0	7,18	0	0	0

Tabela 4.4- Valores médios das grandezas medidas no terceiro ensaio.

$R_{TE}$	$R_{pv}$	$T_{aIn_m}$	$T_{aOut_m}$	$T_{TE-T_m}$	$T_{pvH-TE_m}$	$T_{pvl_m}$	$T_{pvH_m}$	$Rad_m$	$V_{pvl_m}$	$I_{pvl_m}$	$V_{pvH_m}$	$I_{pvH_m}$	$V_{TE_H_m}$	$I_{TE_H_m}$	$P_{pvl_m}$	$P_{pvH_m}$	$P_{TE_H_m}$
[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]	[ $^{\circ}C$ ]	[ $^{\circ}C$ ]	[ $^{\circ}C$ ]	[ $^{\circ}C$ ]	[ $^{\circ}C$ ]	[ $^{\circ}C$ ]	[ $W/m^2$ ]	[V]	[A]	[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[W]	[W]
0	0	27	31	30	33	32	41	1109	0	0,359	0	0,404	0	0,035	0	0	0
3,5	9,1	27	31	30	33	32	41	1109	2,785	0,359	1,574	0,193	0,390	0,026	0,919	0,959	0,043
10,2	21,9	27	31	30	33	32	41	1109	3,27	0,357	3,28	0,356	0,108	0,033	1,167	1,168	0,004
12,2	22,9	27	31	30	33	32	41	1109	5,848	0,281	4,41	0,154	0,301	0,028	1,640	1,118	0,008
15,2	23,3	27	31	30	33	32	41	1109	5,865	0,275	5,405	0,255	0,309	0,028	1,610	1,376	0,009
22	56,6	27	31	30	33	32	41	1109	6,27	0,115	5,915	0,179	0,565	0,025	0,718	1,062	0,013
22,9	101	27	31	34	33	32	41	1109	6,524	0,067	6,97	0,072	0,578	0,026	0,434	0,498	0,015
$\infty$	$\infty$	27	31	34	33	32	41	1109	6,643	0	7,18	0	1,931	0	0	0	0

Tabela 4.5- Tabela dos valores médios obtidos a partir das grandezas medidas no quarto ensaio.

$R_{TE}$ [ $\Omega$ ]	$R_{pv}$ [ $\Omega$ ]	$T_{ainm}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{aoutm}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{TE-Tm}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvH-TE_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvi_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvH_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$Rad_m$ [ $W/m^2$ ]	$V_{pvi_m}$ [V]	$I_{pvi_m}$ [A]	$V_{pvH_m}$ [V]	$I_{pvH_m}$ [A]	$V_{TEH_m}$ [V]	$I_{TEH_m}$ [A]	$P_{pvi_m}$ [W]	$P_{pvH_m}$ [W]	$P_{TEH_m}$ [W]
0	0	25	30	30	32	34	43	1128	0	0,362	0	0,409	0	0	0	0	0
3,5	9,1	25	30	30	32	34	43	1128	2,982	0,360	3,44	0,412	1,072	1,418	1,072	1,418	0,007
10,2	21,9	25	30	30	32	34	43	1128	3,334	0,363	3,88	0,397	1,211	1,542	1,211	1,542	0,007
12,2	22,9	25	30	30	32	34	43	1128	5,88	0,281	5,977	0,285	1,654	1,703	1,654	1,703	0,009
15,2	23,3	25	30	30	32	34	43	1128	5,894	0,276	6,012	0,282	1,625	1,697	1,625	1,697	0,010
22	56,6	25	30	30	32	34	43	1128	6,392	0,116	6,873	0,126	0,744	0,864	0,744	0,864	0,013
22,9	101	25	30	30	32	34	43	1128	6,544	0,067	7,05	0,072	0,435	0,507	0,435	0,507	0,014
$\infty$	$\infty$	25	30	30	32	34	43	1128	6,73	0	7,23	0	0	0	0	0	0

Tabela 4.6- Tabela de valores médios referente as grandezas medidas no quinto ensaio realizado.

$R_{TE}$ [ $\Omega$ ]	$R_{pv}$ [ $\Omega$ ]	$T_{ainm}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{aOutm}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{TE-Tm}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvH-TE_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvl_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvH_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$Rad_m$ [ $W/m^2$ ]	$V_{pvl_m}$ [V]	$I_{pvl_m}$ [A]	$V_{pvH_m}$ [V]	$I_{pvH_m}$ [A]	$V_{TEH_m}$ [V]	$I_{TEH_m}$ [A]	$P_{pvl_m}$ [W]	$P_{pvH_m}$ [W]	$P_{TE_H_m}$ [W]
0	0	25	29	26	28	29	38	1112	0	0,354	0	0,426	0	0,226	0	0	0
3,5	9,1	25	29	26	28	29	38	1112	2,405	0,357	3,351	0,485	0,216	0,023	0,859	1,426	0,005
10,2	21,9	25	29	26	28	29	38	1112	3,295	0,360	4,055	0,44	0,181	0,027	1,185	1,784	0,005
12,2	22,9	25	29	26	28	29	38	1112	5,883	0,279	6,34	0,303	0,277	0,025	1,638	1,922	0,007
15,2	23,3	25	29	26	28	29	38	1112	5,954	0,282	6,34	0,303	0,353	0,025	1,679	1,919	0,009
22	56,6	25	29	26	28	29	38	1112	6,559	0,120	7,015	0,129	0,487	0,022	0,784	0,901	0,011
22,9	101	25	29	26	28	29	38	1112	6,665	0,068	7,155	0,073	0,496	0,021	0,456	0,521	0,010
$\infty$	$\infty$	25	29	26	28	29	38	1112	6,775	0	7,32	0	2,038	0	0	0	0

Tabela 4 7- Dados médios referente as grandezas medidas no sexto ensaio.

$R_{TE}$ [ $\Omega$ ]	$R_{pv}$ [ $\Omega$ ]	$T_{ainm}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{aOutm}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{TE-Tm}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvH-TE_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvl_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvH_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$Rad_m$ [ $W/m^2$ ]	$V_{pvl_m}$ [V]	$I_{pvl_m}$ [A]	$V_{pvH_m}$ [V]	$I_{pvH_m}$ [A]	$V_{TEH_m}$ [V]	$I_{TEH_m}$ [A]	$P_{pvl_m}$ [W]	$P_{pvH_m}$ [W]	$P_{TE_H_m}$ [W]
0	0	24	28	27	29	32	33	1069	0	0,365	0	0,480	0	0	0	0	0
3,5	9,1	24	28	27	29	32	33	1069	3,286	0,359	4,045	0,437	1,179	1,768	1,179	1,767	0,002
10,2	21,9	24	28	27	29	32	33	1069	5,947	0,286	6,264	0,301	1,699	1,887	1,699	1,887	0,006
12,2	22,9	24	28	27	29	32	33	1069	6,053	0,286	6,3089	0,302	1,728	1,908	1,728	1,908	0,006
22	56,6	24	28	27	29	32	33	1069	6,566	0,120	6,954	0,128	0,790	0,101	0,791	0,888	0,008
22,9	101	24	28	27	29	32	33	1069	6,7	0,068	7,102	0,073	0,458	0,516	0,458	0,516	0,009
$\infty$	$\infty$	24	28	27	29	32	33	1069	6,912	0	7,286	0	0	0	1,782	0	0

Tabela 4.8- Tabela de valores médios referente as grandezas medidas no sétimo ensaio.

$R_{TE}$ [ $\Omega$ ]	$R_{pv}$ [ $\Omega$ ]	$T_{ain_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{aOut_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{TE-T_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvH-TE_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvi_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$T_{pvH_m}$ [ $^{\circ}C$ ]	$Rad_m$ [ $W/m^2$ ]	$V_{pvi_m}$ [V]	$I_{pvi_m}$ [A]	$V_{pvH_m}$ [V]	$I_{pvH_m}$ [A]	$V_{TEH_m}$ [V]	$I_{TEGH_m}$ [A]	$P_{pvi_m}$ [W]	$P_{pvH_m}$ [W]	$P_{TE_H_m}$ [W]
0	0	24	27	27	29	28	33	1078	0	0,353	0	0,5	0	0	0	0	0
3,5	9,1	24	27	27	29	28	33	1078	3,213	0,349	4,127	0,449	1,122	1,855	1,122	1,855	0,003
10,2	21,9	24	27	27	29	28	33	1078	6,010	0,285	6,399	0,306	1,715	1,958	1,715	1,958	0,006
12,2	22,9	24	27	27	29	28	33	1078	6,023	0,284	6,401	0,304	1,715	1,947	1,715	1,947	0,007
22	56,6	24	27	27	29	28	33	1078	6,593	0,122	7,033	0,129	0,801	0,907	0,801	0,907	0,011
22,9	101	24	27	27	29	28	33	1078	6,697	0,068	7,16	0,072	0,458	0,518	0,458	0,518	0,011
$\infty$	$\infty$	24	27	27	29	28	33	1078	6,897	0	7,317	0	0	0	0	0	0

Nesta secção foram apresentados todos os dados médios das grandezas medidas durante cada ensaio em forma de tabelas. De forma a se ter uma melhor compreensão dos resultados obtidos. Nestas tabelas também estão representados os respetivos valores médios de radiação solar, as cargas utilizadas, temperaturas entre outras. Na próxima secção serão representados estas tabelas em forma de gráfico de dispersão.

### 4.3. Análise gráfica dos resultados

Na secção anterior foram apresentados os valores dos ensaios realizados em forma de tabelas, nesta nova secção serão apresentados esses mesmos resultados graficamente, em que, como referido anteriormente que os ensaios foram divididos em dois grupos, onde o primeiro grupo foram ensaios sem carga elétrica e o segundo com diferentes cargas elétricas. Desta forma vamos poder analisar o desempenho destes módulos graficamente. A partir da tabela 4.1 foi possível traçar o gráfico da curva característica corrente-tensão referente ao painel fotovoltaico do módulo híbrido e do painel fotovoltaico isolado, isto para o primeiro ensaio, como é mostrado na figura 4.1.

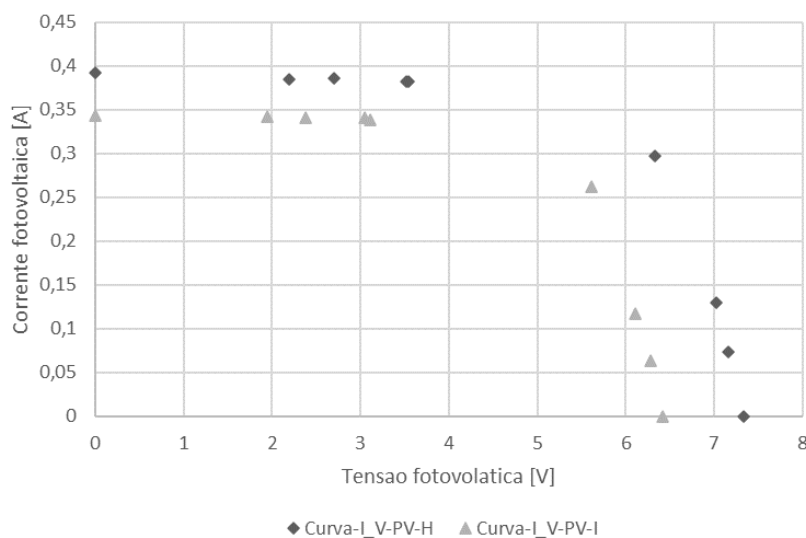


Figura 4.1 - Gráfico da curva de corrente-tensão do painel fotovoltaico híbrido e isolado, referente ao primeiro ensaio.

Como é possível observar na figura 4.1 do desempenho do painel fotovoltaico do modulo híbrido é melhor do que o painel em funcionamento isolado.

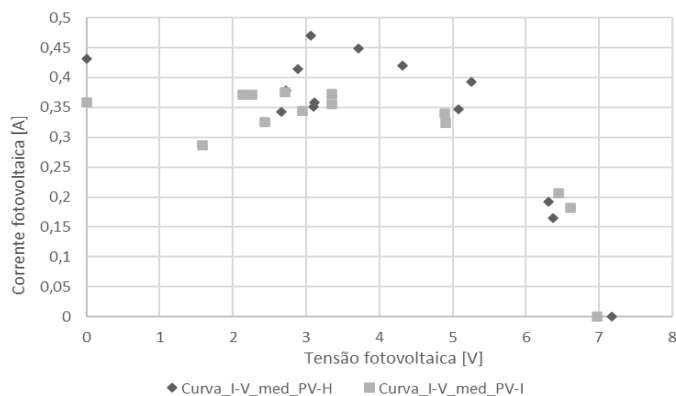


Figura 4 2 - Curva característica corrente-tensão para os painéis fotovoltaicos para o segundo ensaio.

Com base na tabela 4.2 foi possível traçar o gráfico demonstrado na figura 4.2 para os painéis fotovoltaicos do módulo híbrido e isolado com diferentes cargas elétricas de modo a ver a curva produzida por estas cargas.

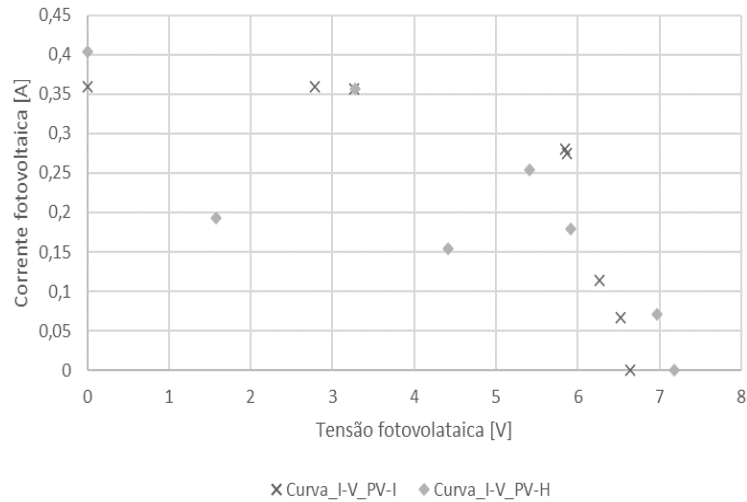


Figura 4.3 - Gráfico de curva corrente-tensão dos painéis fotovoltaicos referente a terceiro ensaio.

O gráfico que esta representado na figura 4.3, refere-se a curva caraterística de corrente e tensão para o painel fotovoltaico isolado e híbrido, este gráfico é baseado nos dados apresentado na tabela 4.3.

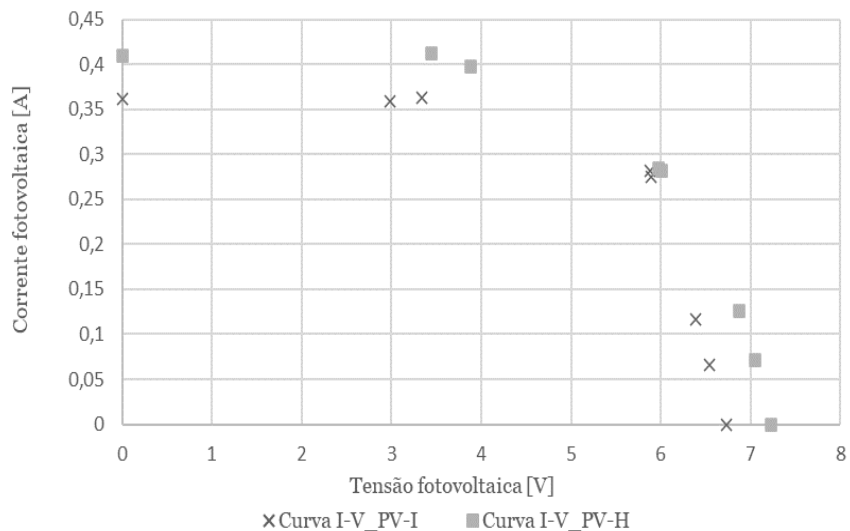


Figura 4.4 - Gráfico de curva corrente-tensão dos painéis fotovoltaicos isolado e híbrido para o quarto ensaio.

Já para a tabela 4.4 foi traçado um gráfico que esta representado na figura 4.4 referente ao quarto ensaio onde podemos ver que a curva I-V do painel fotovoltaico híbrido tem melhor desempenho em função ao painel isolado.

Na figura 4.5 esta representado o gráfico da curva corrente-tensão dos painéis fotovoltaicos, em que os valores foram obtidos no quinto ensaio apresentado na tabela 4.5.

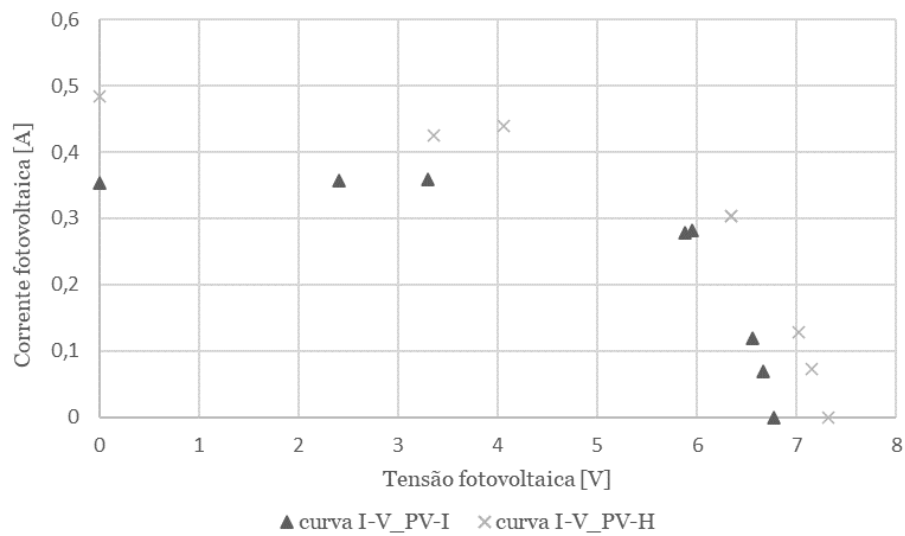


Figura 4.5 - Curva I-V dos painéis fotovoltaicos do quinto ensaio.

Na figura 4.6 esta representada a última curva corrente-tensão referente aos módulos fotovoltaicos, isto é para sexto ensaio, os dados para este gráfico estão apresentados na tabela 4.6.

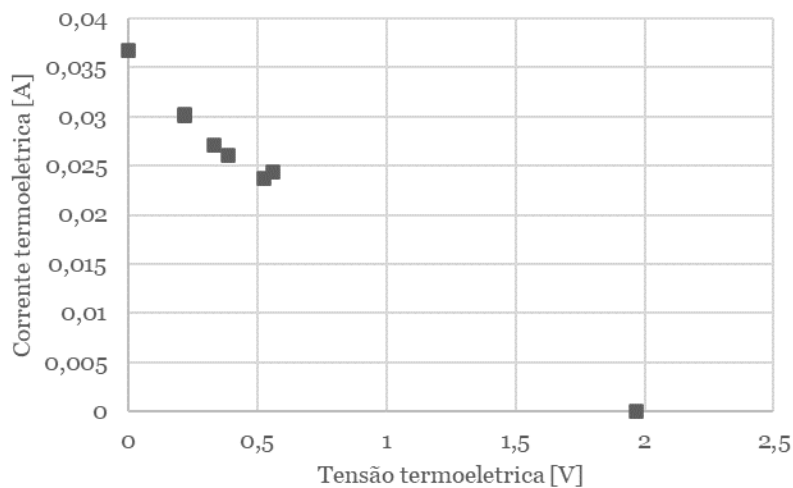


Figura 4.6 - Curva característica corrente-tensão fotovoltaicas, para o sexto ensaio.

A seguir serão apresentados os gráficos referente a produção do conjunto termoeletrico, para este conjunto as curvas características obtidas não mostraram um desempenho, por isso optou em apresentar alguns destes gráficos para se ter uma ideia de com foi o

comportamento deste módulo. Nas figuras 4.7 e 4.8 estão apresentadas estas curvas características baseadas nas tabelas 4.3 e 4.4, referente ao primeiro e segundo ensaio do conjunto termoeletrico.

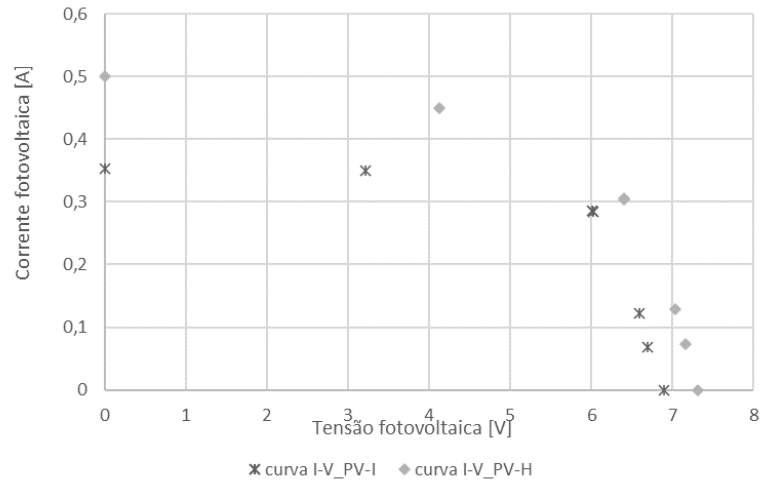


Figura 4.7 - Curva I-V do conjunto termoeletrico referente ao primeiro ensaio deste conjunto.

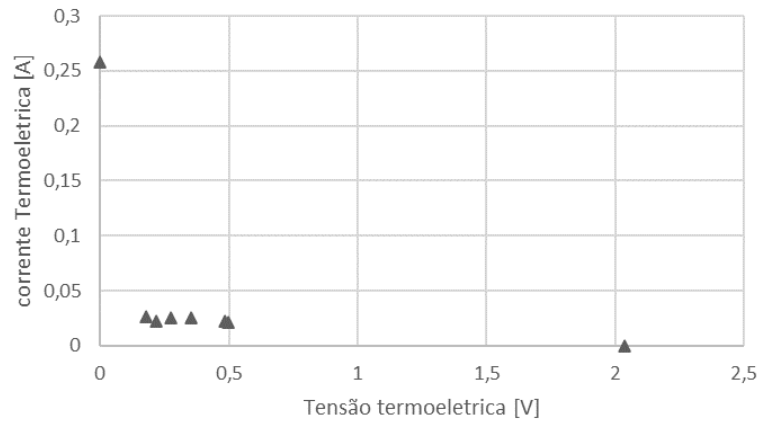


Figura 4.8 - Gráfico da curva I-V, referente terceiro ensaio, para o módulo termoeletrico.

Os gráficos apresentados nesta secção fazem parte dos ensaios realizados, onde os painéis fotovoltaicos tiveram melhor desempenho na curva característica, quanto ao conjunto termoeletrico a baixa eficiência das células termoeletricas traduz-se na produção elétrica também. Na figura 4.9 é apresentado o gráfico da potência elétrica produzida pelos três módulos elétricos (painéis fotovoltaicos e conjunto termoeletrico), onde o melhor desempenho obtido pelo painel fotovoltaico do módulo solar híbrido. Na figura 4.10 esta representada o gráfico da potência térmica obtida a partir dos diferentes

ensaios apresentados nas tabelas da secção anterior. A potência térmica é a que teve melhor desempenho em comparação as outras tecnologias utilizadas.

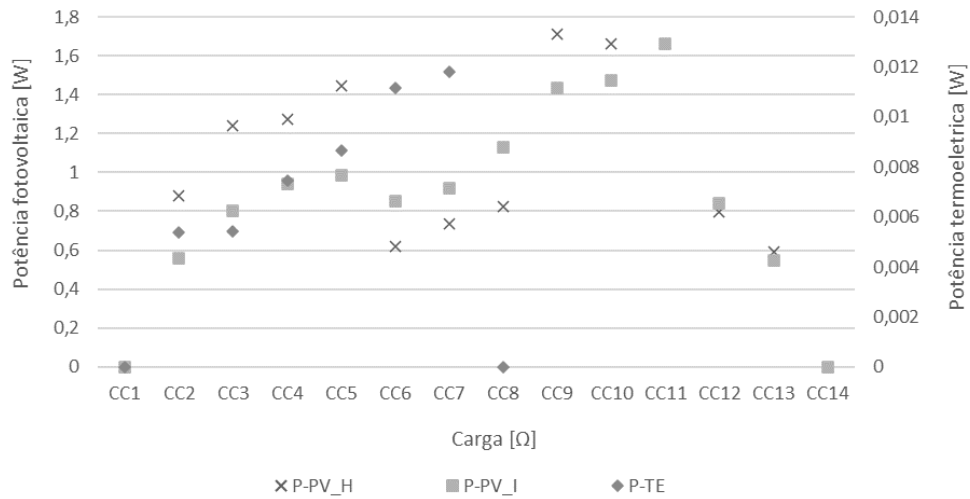


Figura 4 9 - Gráfico da potência total termoeletrica, fotovoltaica isolada e híbrida para todos os ensaios.

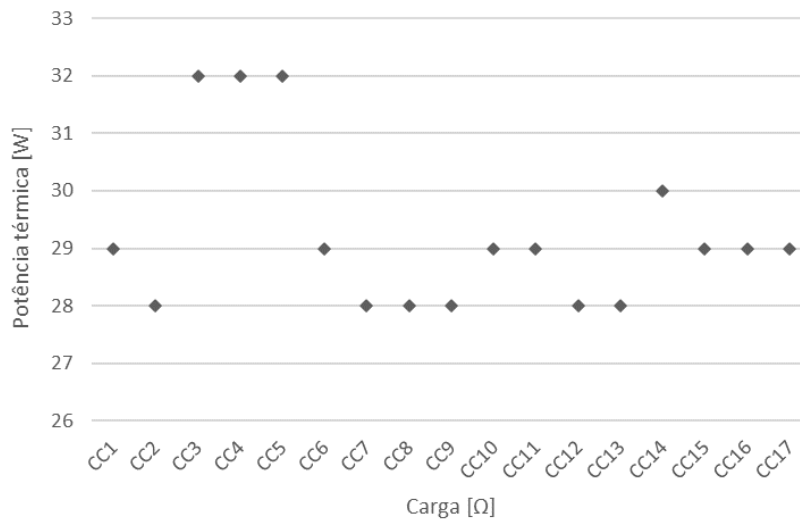


Figura 4 10 - Gráfico da potência térmica total.

#### 4.4. Grandezas calculadas

Nesta sessão serão apresentados os parâmetros calculados de potência e rendimento de ambos os módulos utilizados, no caso o painel fotovoltaico isolado e do módulo solar híbrido construído. No primeiro ensaio que foi denominado por ensaio em vazio que não foi aplicado qualquer resistência elétrica nos dois circuitos elétricos utilizados, não se obteve uma potência elétrica, pois os ensaios deste grupo foram feitos com o intuito de ver os máximos valores de corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto produzido pelos módulos fotovoltaicos e termoelétrico, como se pode ver nos gráficos apresentados na sessão anterior. A seguir são apresentados os valores de potência de pico referente ao ensaio em que foram aplicadas cargas elétricas nos circuitos elétricos fotovoltaico e termoelétrico. Os testes que constituem estes ensaios foram realizados em condições climáticas com ausência de nuvens. Assim, para o ensaio onde foram aplicadas estas cargas obteve-se uma potência de pico igual a 11 mW para o conjunto termoelétrico, a uma carga de 22,9  $\Omega$ , que foi a maior carga utilizada para esta componente. Enquanto a carga mais baixa de 3,5  $\Omega$  do conjunto termoelétrico apenas conseguiu alcançar uma potência de 5,3 mW, onde se pode verificar que as energias produzidas pelos módulos termoelétricos são extremamente baixas, não passando dos milésimos de watts. Já para o painel fotovoltaico acoplado ao módulo híbrido, os valores produzidos foram se notando um crescimento e descida à medida que se foi aumentando os valores das cargas elétricas. Assim, verificou que a potência de pico produzido por este módulo foi alcançado quando foi aplicada uma carga de 21,9  $\Omega$ , registando assim 1,71 W de potência de pico. De seguida notou-se uma redução deste valor quando o painel fotovoltaico híbrido foi aplicado uma resistência de 56,6  $\Omega$  e 101  $\Omega$ , onde as potências produzidas foram de 0,8 W a 0,6 W, respetivamente. Por fim, a potência de pico produzida pelo módulo térmico (permutador de calor) utilizado não foi influenciada pela aplicação das cargas elétricas usadas pelos painéis fotovoltaicos e conjunto termoelétrico, desta forma, foi a maior potência registada em comparação com as potências produzida pelas outras componentes. Assim, o permutador de calor registou 21,0 W do pico da potência térmica. Verifica-se que os testes realizados com valores de cargas mais baixas e medias, produzem melhores valores de pico em termo de potência do que as resistências de valores mais altos. Assim para o módulo solar híbrido foi registada uma potência total de 22,7 W. Já no que se refere a eficiência ou rendimento do módulo híbrido teve uma eficiência de 76,3%, isto a um valor de pico de radiação solar de 1093  $W/m^2$ . Também como foi referido anteriormente que se procedeu aos testes de um painel fotovoltaico isolado com o propósito de se comparar os valores obtidos com o painel fotovoltaico acoplado ao sistema híbrido. Destas mesmas cargas e radiação solar de pico foi registado uma potência de pico para esta célula em funcionamento convencional de 1,48 W,

quando foi aplicada a uma carga elétrica de  $22,9 \Omega$  o que se pode concluir que o método acoplado dos painéis fotovoltaicos com as outras tecnologias ajuda significativamente o desempenho destas células, devido ao arrefecimento das mesmas. Assim sendo este modulo fotovoltaico isolado a uma intensidade de radiação solar de  $1093 W/m^2$ , obteve um rendimento de cerca de 5,0%.

### Discussão geral dos resultados

De uma forma geral, pode se concluir que o acoplamento de componentes que fazem parte da coleta de energia solar, como é o caso do módulo solar híbrido é possível produzir com eficiência energia térmica e elétrica, embora a produção de energia termoelétrica tenha se verificado muito abaixo do que se pretendia, ainda assim é possível melhorar esta produção com a implementação de melhores métodos de conversão. Neste trabalho a potência térmica revelou-se muito promissora para a utilização da cogeração de sistemas devido ao seu caráter de não dependência das cargas elétricas utilizadas no modulo híbrido. A magnitude do valor 76,3% do rendimento alcançado por este modulo híbrido mostra a sua eficácia no aproveitamento solar térmico e elétrico, embora o maior mérito dá-se a produção térmica, quando comparada as outras duas componentes que constituem este sistema híbrido.

# Capítulo 5

## 5.1. Conclusões finais

Esta dissertação tem como objetivo o estudo e avaliação experimental de um protótipo de forma a aumentar o rendimento de um módulo fotovoltaico, termoelétrico e térmico. O estudo detalhado do módulo solar híbrido foi composto por diversas fases de reconstrução, como compra de alguns componentes, arranjos de alguns materiais como o permutador que foi o meio de aproveitamento solar térmico, o ajuste dos materiais para utilização da água da rede que foi utilizado como fluido de aproveitamento térmico e arrefecimento das células fotovoltaicas, a divisão dos tipos de ensaios a se realizar (ensaios em vazios e ensaios com aplicações de cargas elétricas no circuito fotovoltaico e termoelétrico) e a comparação dos testes realizados com um painel fotovoltaico isolado de modo a comparar o desempenho com o módulo fotovoltaico acoplado ao sistema híbrido. Depois de toda a análise e realização do trabalho experimental, conclui-se que o aproveitamento térmico teve melhor desempenho no aumento do rendimento da cogeração do sistema híbrido. A componente fotovoltaica mostrou-se eficaz quanto ao método de arrefecimento das células fotovoltaicas o que traduz no aumento da sua eficiência quando comparado com funcionamento de um painel fotovoltaico convencional. De forma geral, o módulo solar híbrido proposto é uma técnica fiável para se resolver o problema do aumento da temperatura dos módulos fotovoltaicos, produzir mais energia elétrica a partir dos módulos termoelétricos e recuperar o calor desperdiçado pelos painéis fotovoltaicos para o aproveitamento térmico. Este método traduz-se num aumento geral de produção energética sustentável, que a atual maior preocupação da sociedade.

## 5.2. Sugestões para futuros trabalhos

O presente trabalho realizado, com acoplamento de três principais componentes sustentáveis e de produção de energia limpa, constitui uma forte motivação para sugestões de trabalhos futuros como:

- Utilização de materiais termoelétricos com maior eficiência de produção elétrica.
- Acoplamento de um módulo termoelétrico com a parte traseira de um coletor térmico, de modo a se produzir energia elétrica adicional

## Referências

- [1] I. Bosu, H. Mahmoud, S. Ookawara, and H. Hassan, “Applied single and hybrid solar energy techniques for building energy consumption and thermal comfort: A comprehensive review,” *Sol. Energy*, vol. 259, no. May 2022, pp. 188–228, 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.05.006.
- [2] T. Güney and D. İnce, “Solar Energy and CO2 Emissions: CCEMG Estimations for 26 Countries,” *J. Knowl. Econ.*, no. 0123456789, Mar. 2023, doi: 10.1007/s13132-023-01337-2.
- [3] S. M. Alawad, R. Ben Mansour, F. A. Al-Sulaiman, and S. Rehman, “Renewable energy systems for water desalination applications: A comprehensive review,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 286, no. April, p. 117035, 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117035.
- [4] E. T. Sayed *et al.*, “Renewable Energy and Energy Storage Systems,” pp. 1–26, 2023.
- [5] P. G. V. Sampaio and M. O. A. González, “Photovoltaic solar energy: Conceptual framework,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. June 2016, pp. 590–601, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.081.
- [6] C. A. F. Ramos, A. N. Alcaso, and A. J. M. Cardoso, “Tecnologia Solar Híbrida,” *XVII Congr. Ibérico y XIII Congr. Iberoam. Energía Sol.*, pp. 1–9, 2020.
- [7] A. M. Soomar, A. Hakeem, M. Messaoudi, P. Musznicki, A. Iqbal, and S. Czapp, “Solar Photovoltaic Energy Optimization and Challenges,” *Front. Energy Res.*, vol. 10, no. May, pp. 1–18, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.879985.
- [8] N. Zhang, Z. Zhang, Z. Cong, H. Lei, and Y. Luo, “The impact of photovoltaic power plants on surface energy budget based on an ecohydrological model,” *Renew. Energy*, vol. 212, no. May, pp. 589–600, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.05.068.
- [9] Y. M. Liu, K. M. Chung, K. C. Chang, and T. S. Lee, “Performance of thermosiphon solar water heaters in series,” *Energies*, vol. 5, no. 9, pp. 3266–3278, 2012, doi: 10.3390/en5093266.
- [10] E. I. Sakellariou, P. J. Axaopoulos, B. V. Bot, and K. A. Kavadias, “First Law Comparison of a Forced-Circulation Solar Water Heating System with an Identical Thermosiphon,” *Energies*, vol. 16, no. 1, 2023, doi: 10.3390/en16010431.
- [11] S. Kalogirou, “Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 1, pp. 39–48, 2009, doi: 10.1016/j.solener.2008.06.005.
- [12] M. J. R. Abdunnabia, K. M. A. Alakder, N. A. Alkishriwi, and S. M. Abughres, “Experimental validation of forced circulation of solar water heating systems in TRNSYS,” *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 2477–2486, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.257.
- [13] M. S. Buker and S. B. Riffat, “Building integrated solar thermal collectors - A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 327–346, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.06.009.
- [14] L. Kumar, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, “Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 195, no. February, pp. 885–908, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.05.081.
- [15] J. Subtil Lacerda and J. C. J. M. Van Den Bergh, “Diversity in solar photovoltaic energy: Implications for innovation and policy,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 331–340, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.032.

- [16] N. S. M. N. Izam, Z. Itam, W. L. Sing, and A. Syamsir, “Sustainable Development Perspectives of Solar Energy Technologies with Focus on Solar Photovoltaic—A Review,” *Energies*, vol. 15, no. 8, pp. 1–15, 2022, doi: 10.3390/en15082790.
- [17] W. Kuczynski and K. Chliszcz, “Energy and exergy analysis of photovoltaic panels in northern Poland,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 174, no. January 2021, p. 113138, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2022.113138.
- [18] M. A. I. Khan *et al.*, “An Experimental and Comparative Performance Evaluation of a Hybrid Photovoltaic-Thermoelectric System,” *Front. Energy Res.*, vol. 9, no. September, pp. 1–9, 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.722514.
- [19] S. M. Pourkiaei *et al.*, “Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices: A review of present and potential applications, modeling and materials,” *Energy*, vol. 186, p. 115849, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.07.179.
- [20] J. Wei *et al.*, “Recent advances in thermoelectric technology to harvest energy from the pavement,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 46, no. 8, pp. 10453–10474, 2022, doi: 10.1002/er.7930.
- [21] A. Muhamad Zuhud, F. Mochammad, and W. Widayat, “Thermoelectric application in energy conservation,” *E3S Web Conf.*, vol. 73, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20187301009.
- [22] N. Jaziri, A. Boughamoura, J. Müller, B. Mezghani, F. Tounsi, and M. Ismail, “A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 264–287, 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2019.12.011.
- [23] A. Kumar, S. Bano, B. Govind, A. Bhardwaj, K. Bhatt, and D. K. Misra, “A Review on Fundamentals, Design and Optimization to High ZT of Thermoelectric Materials for Application to Thermoelectric Technology,” *J. Electron. Mater.*, vol. 50, no. 11, pp. 6037–6059, 2021, doi: 10.1007/s11664-021-09153-7.
- [24] L. Zhang and Z. Chen, “Design and research of the movable hybrid photovoltaic-thermal (PVT) system,” *Energies*, vol. 10, no. 4, 2017, doi: 10.3390/en10040507.
- [25] Z. U. Abdin and A. Rachid, “A survey on applications of hybrid pv/t panels,” *Energies*, vol. 14, no. 4, 2021, doi: 10.3390/en14041205.
- [26] A. Faddouli, M. Hajji, S. Fadili, B. Hartiti, H. Labrim, and A. Habchi, “A comprehensive review of solar , thermal , photovoltaic , and thermoelectric hybrid systems for heating and power generation,” *Int. J. Green Energy*, vol. 00, no. 00, pp. 1–35, 2023, doi: 10.1080/15435075.2023.2196340.
- [27] L. Rekha, M. M. Vijayalakshmi, and E. Natarajan, “Photovoltaic thermal hybrid solar system for residential applications,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 38, no. 7, pp. 951–959, 2016, doi: 10.1080/15567036.2011.651560.
- [28] L. Xu, K. Luo, J. Ji, B. Yu, Z. Li, and S. Huang, “Study of a hybrid BIPV / T solar wall system,” *Energy*, vol. 193, p. 116578, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116578.
- [29] E. Yin and Q. Li, “Device performance matching and optimization of photovoltaic-thermoelectric hybrid system,” *Energy Convers. Manag. X*, vol. 12, no. June, p. 100115, 2021, doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100115.
- [30] Y. J. Cui, B. L. Wang, J. E. Li, and K. F. Wang, “Performance evaluation and lifetime prediction of a segmented photovoltaic-thermoelectric hybrid system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 211, no. March, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112744.
- [31] S. Shittu, G. Li, X. Zhao, J. Zhou, X. Ma, and Y. G. Akhlaghi, “Experimental study and exergy analysis of photovoltaic-thermoelectric with flat plate micro-channel

- heat pipe,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 207, no. October 2019, p. 112515, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112515.
- [32] Y. Zhang and P. Gao, “Hybrid Photovoltaic/Thermoelectric Systems for Round-the-Clock Energy Harvesting,” *Molecules*, vol. 27, no. 21, pp. 1–20, 2022, doi: 10.3390/molecules27217590.
- [33] M. T. Pintanel *et al.*, “Analysis of the experimental integration of thermoelectric generators in photovoltaic–thermal hybrid panels,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 7, 2021, doi: 10.3390/app11072915.
- [34] A. Akbar, G. Najafi, S. Gorjian, A. Kasaeian, and M. Mazlan, “Performance enhancement of a hybrid photovoltaic-thermal-thermoelectric (PVT-TE) module using nanofluid-based cooling: Indoor experimental tests and multi-objective optimization,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 46, no. December 2020, p. 101276, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101276.
- [35] C. Haiping, H. Jiguang, Z. Heng, L. Kai, L. Haowen, and L. Shuangyin, “Experimental investigation of a novel low concentrating photovoltaic / thermal e thermoelectric generator hybrid system,” *Energy*, vol. 166, pp. 83–95, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.10.046.
- [36] N. Cooling and K. S. Garud, “SS symmetry Review on Performance Enhancement of Photovoltaic / Thermal – Thermoelectric Generator Systems with,” vol. 14, no. 1, pp. 2–22, 2022.
- [37] F. Matias, L. C. Pires, P. D. Silva, and P. D. Gaspar, “Experimental study of a hybrid solar photovoltaic, thermoelectric and thermal module,” *E3S Web Conf.*, vol. 152, pp. 0–5, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202015201005.