



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Trabalho efetuado sob a orientação de



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Trabalho efetuado sob a orientação de

“De nenhum fruto queiras só metade”

Miguel Torga

Agradecimentos

O presente documento representa um percurso iniciado na ESTGV em 2016. Foram anos de vivências inesquecíveis, com momentos bons e menos bons.

Em primeiro lugar agradecer aos meus orientadores Professor Doutor Paulo Joaquim Antunes Vaz e Professor Doutor Hugo Heitor Moreira Enes Ferreira pela disponibilidade, conselhos, espírito crítico e acompanhamento prestado.

De seguida quero agradecer aos meus pais e à minha irmã por estarem ao meu lado, apoiarem-me nas vitórias e ampararem-me nas derrotas.

Quero agradecer em especial à minha namorada por ser o meu ombro amigo, minha confidente e o apoio incondicional em todo o meu percurso académico e pessoal.

Para finalizar agradecer com especial carinho e apreço, a todos os restantes familiares, amigos, colegas e restante corpo docente, pelos conselhos e partilhas de experiências, pois foram a força motriz para o término deste belo percurso.

O meu muito obrigado!

Resumo

A sustentabilidade é a possibilidade de satisfazer as necessidades dos dias de hoje não comprometendo as necessidades das gerações futuras. Assim sendo o uso racional da energia tem sido amplamente discutido nas mais variadas conferências mundiais. No entanto são inúmeros os estudos sobre o aproveitamento da energia solar.

Os fornos solares surgem como um equipamento em que a energia necessária ao seu bom funcionamento é apenas a radiação emitida pelo sol.

Atualmente, existem várias configurações de fornos solares com o objetivo de otimizar a confeção de alimentos. Para este estudo foi realizada uma classificação em dois tipos principais de fornos solares, o tipo direto e o indireto.

Os fornos solares do tipo direto utilizam a radiação solar diretamente do sol para o utensílio de cozinha, sendo a sua principal vantagem o custo de produção, pois não é necessário recorrer a materiais dispendiosos. A principal desvantagem é que o forno solar só consegue estar em funcionamento quando existe a presença de sol.

No caso do forno solar do tipo indireto, a principal vantagem é a possibilidade de cozinhar em períodos que não tenham radiação solar, pois tem mecanismos de armazenamento e energia, mas para que isto aconteça, é necessário um investimento maior, ou seja, o custo dos meios é muito superior aos fornos solares do tipo direto.

Este estudo tem como objetivos, conhecer várias formas e conceitos utilizados na construção de fornos solares e posterior construção de um dos fornos mais comuns e mais estudados com vista a testar o seu comportamento técnico e a estudar a viabilidade da sua utilização em Portugal.

Palavras-chave: Forno Solar; Radiação Solar; Eficiência Térmica

Abstract

Sustainability is the possibility of satisfying the needs of today, without compromising the needs of future generations. Therefore, the rational use of energy has been widely discussed in the most diverse world conferences. However, studies on the use of solar energy are considerable.

Solar ovens appear as equipment in which the energy required for their proper functioning is only the radiation emitted by the sun.

Currently, there are several configurations of solar ovens with the aim of optimizing food preparation. For this study, a classification was carried out into two main types of solar ovens, direct and indirect.

Direct type solar ovens use solar radiation directly from the sun to the kitchen utensil, their main advantage being the production cost, as it is not necessary to use expensive materials. The main disadvantage is that the solar oven can only operate when the sun is present.

In the case of the indirect solar oven, the main advantage is the possibility of cooking in periods when there is no solar radiation, as there are storage and energy mechanisms, but for this to happen, a greater investment is necessary, that is, it makes the less economically accessible solar oven.

This study aims to understand the various forms and concepts used in the construction of solar ovens and the subsequent construction of one of the most common and most trained ovens with a view to testing its technical behavior and studying predictions of its use in Portugal.

Keywords: Solar Cooker; Solar Radiation; Thermal Efficiency

Índice	
Agradecimentos.....	III
Resumo.....	V
Abstract	VII
Índice.....	IX
Índice de Tabelas.....	XI
Índice de Figuras	XII
Índice de Gráficos	XIV
Lista de Siglas e Abreviaturas.....	XV
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos da investigação.....	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	2
2. Metodologia de revisão	5
3. Revisão da literatura	7
3.1. Energia solar.....	7
3.1.1. Radiação solar	7
3.1.2. Potencial solar	9
3.1.3. Aproveitamentos inovadores da energia solar	12
3.2. Princípio de funcionamento do Forno Solar	17
3.3. Tipos de Fornos Solares	18
3.3.1. Forno solar direto	19
3.3.2. Forno solar indireto	23

3.4.	Indicadores de desempenho	28
3.5.	Área Geográfica dos Estudos Efetuados	31
4.	Caso de Estudo	33
4.2.1.	Procedimento.....	34
4.2.2.	Aquisição de Dados.....	34
4.2.3.	Procedimento de aferição da eficiência instantânea	36
4.2.4.	Viabilidade de um Forno solar	39
4.2.5.	Materiais utilizados	41
4.2.6.	Resultados Obtidos.....	42
5.	Análise crítica dos resultados	43
6.	Conclusão	45
7.	Referências bibliográficas	47
8.	Anexos	61

Índice de Tabelas

Tabela 1: Classificação dos Fornos Solares.....	18
Tabela 2: Indicadores de desempenho dos variados tipos de fornos.	28
Tabela 3: Tabela com materiais utilizados no caso de estudo	41

Índice de Figuras

Figura 1: Movimento da Terra em torno do Sol – Fonte: (Bombelli et al., 2019).....	8
Figura 2: Espectro da Radiação solar Fonte:(F. H. Santos et al., 2015).....	9
Figura 3: Irradiação global captada pela superfície terrestre Fonte (The World Bank, Global Solar Atlas 2.0, Solar Resource Data: Solargis, 2020).....	10
Figura 4: Irradiação captada pelo território Português Fonte:(The World Bank, Global Solar Atlas 2.0, Solar Resource Data: Solargis, 2020).....	11
Figura 5:Altura da atmosfera – Fonte:(Kalogirou, 2013).....	12
Figura 6: Esquema do estudo de geração de eletricidade a partir de evaporação de água. Fonte: (Fang et al., 2022).....	14
Figura 7: Destilador solar esquemático com aquecedor de água alimentado por módulo fotovoltaico Fonte:(Kabeel et al., 2021).....	15
Figura 8: Projeto de isolamento térmico progressivo para um sistema de evaporação interfacial movido a energia solar. Fonte: (Tao et al., 2018).....	15
Figura 9: Secador solar de convecção forçada para secagem de arroz. Fonte (Soponronnarit, 1995).....	16
Figura 10: Secador de túnel solar tipo estufa de convecção natural. Fonte (Sastroamidjojo, M S.A., 1984).....	16
Figura 11: Secador solar tipo caixa comercializado na Tailândia. Fonte (Soponronnarit, 1995):.....	16
Figura 12: Secador de efeito estufa híbrido fotovoltaico-térmico. Fonte (Barnwal & Tiwari, 2008).....	16
Figura 13:Demonstração do forno solar pela cientista Maria Telkes. Fonte:(Halacy & Halacy, 1992).....	17
Figura 14: Forno de Horace de Saussure. Fonte (Horace De Saussure and his hot boxes of the 1767, 2002).....	19
Figura 15: Constituição do forno solar. Fonte:(Gomes, 2004).....	19
Figura 16: Fornos utilizados no estudo acima descrito Fonte: (Harmim et al., 2010).....	20

Figura 17: Forno solar SunTaste 200 Fonte: (A. Tavares et al., 2018)	21
Figura 18: Forno solar do tipo painel solar Fonte: (Faustino Neto & Guerra, 2020)	22
Figura 19: Forno solar com concentração de radiação em baixo Fonte:(Das et al., 2019).....	22
Figura 20: Forno solar com concentração de radiação em baixo	23
Figura 21: Forno solar indireto com armazenamento de energia no forma sensível onde TES (thermal energy storage) Fonte:(Solomon, 2014).....	24
Figura 22: Diagrama esquemático da unidade de armazenamento de calor latente. Fonte:(Sharma et al., 2000)	25
Figura 23:Forno solar indireto com coletor solar na forma de placa plana Fonte: (H.M.S et al., 2008)	26
Figura 24: Forno solar testado em laboratório em Marrocos. Fonte: (El Moussaoui et al., 2020)	27
Figura 25: Esquema de instalação em habitação familiar.....	28
Figura 26: Imagem do forno testado.....	28
Figura 27: Ambiente de trabalho do Software PicoLog 6	35
Figura 28: Ambiente de trabalho do Software LabVIEW	35
Figura 29: Ambiente de trabalho da Folha de Calculo Excel.....	36
Figura 30: Forno solar utilizado no caso de estudo.	41

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Distribuição geográfica de estudos sobre fornos solares.....	31
Gráfico 2 - Evolução das temperaturas e da radiação no dia 29 de setembro	39
Gráfico 3: Evolução das temperaturas e da radiação no dia 14 de outubro de 2020 .	40
Gráfico 4: Análise da viabilidade do forno no dia 14 de outubro de 2020.....	40

Lista de Siglas e Abreviaturas

RCAAP	Repositórios Científicos de Acesso Aberto de Portugal
AU	Unidade astronómica
ΔT	Intervalo de temperatura
PCM	Material mudança de fase (Phase Change Materials)
IA	Inteligência Artificial

Introdução

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Nos últimos tempos, o tema da sustentabilidade tem sido alvo dos mais variados estudos académicos centrados, por exemplo, na redução da pegada carbónica e numa utilização mais racional dos recursos naturais/ energéticos.

Sendo a radiação proveniente do sol a principal fonte de energia utilizada na Terra, torna-se uma clara alternativa ao gás e à eletricidade. A energia solar é utilizada em todo o mundo para produção de eletricidade por ser de uma fonte renovável. Esta divide-se em dois grupos: a energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica. A energia solar térmica tem por base o aquecimento de líquidos, podendo estes ser água, no caso de uso doméstico, ou outro tipo de substância para utilização ciclos de potência para produção de eletricidade. A energia solar fotovoltaica converte o calor que é recebido do Sol em eletricidade utilizando o efeito fotoelétrico. (Torres, 2021).

Como a atividade de cozinhar é uma ação essencial para o ser humano em todo o mundo, o forno solar aparece como uma alternativa aos eletrodomésticos usados em todos os lares e torna-se numa oportunidade em países em vias de desenvolvimento e em que há escassez de recursos técnicos e energéticos (Kumar et al., 2022). Segundo vários estudos, (Solar Cooker at Cantina West, 2017; Solar Cookers Internacional, 2019; A. C. M. Tavares, 2018; Wentzel & Pouris, 2007) o forno solar é uma solução cada vez mais apresentada para problemas associados à sustentabilidade. No entanto, é um equipamento já há muito desenvolvido.

O seu início remonta ao ano de 1767, onde a primeira investigação foi realizada por Tschirnhausen (1651 – 1708), um físico alemão, que consistiu em utilizar uma lente de

Introdução

grande dimensão para focalizar os raios de sol e ferver a água numa panela de barro. Com base nesta experiência foi publicado um estudo sobre fornos solares, pelo cientista suíço Horace de Saussure. O mesmo baseou-se no trabalho de Tschirnhausen, e assim, concluiu que, utilizando uma caixa de madeira, conseguia ter temperatura suficiente para cozinhar frutas (Solar Cookers Internacional, 2019).

Um forno solar tem como principal vantagem o seu baixo custo, pois não é necessária outra fonte de energia para o seu funcionamento, para além da radiação solar. Esse aspeto é tido em conta pelo consumidor final, de modo a garantir que esse custo seja acessível ao seu orçamento familiar.

Atualmente, existem várias configurações de fornos solares com o objetivo de otimizar a confeção de alimentos. Neste trabalho foi dividida a configuração dos fornos solares em dois grandes tipos, sendo eles o tipo direto, que utiliza a luz solar diretamente para o utensílio de cozinha, e o tipo indireto, onde o calor é transferido para o forno solar usando um fluido de transferência de calor (Geddam et al., 2015; Herez et al., 2018; A. C. M. Tavares, 2018).

1.2. Objetivos da investigação

Este projeto estuda os vários tipos de fornos solares capazes de serem uma alternativa viável a outros equipamentos, com a mesma finalidade, que usem recursos energéticos dispendiosos para as famílias, tais como, a eletricidade e o gás. Concretamente pretende-se:

A) Tipificar as várias formas de fornos solares e analisar as melhores opções para maximizar o rendimento.

B) Analisar a viabilidade da sua utilização em Portugal.

1.3. Estrutura da dissertação

Este trabalho é composto por 6 capítulos. No primeiro capítulo, é realizado o enquadramento do tema, são elencados os objetivos a atingir e as motivações do estudo.

No segundo capítulo, é apresentada a metodologia de revisão que foi seguida para a recolha de toda a informação disponível, em bases de dados online, para posterior análise dos estudos realizados sobre o tema em análise.

Introdução

No terceiro capítulo, a revisão da literatura é concretizada, sendo abordado o conceito de energia solar, onde são apresentados estudos de previsão de irradiação solar, como também outras aplicações em que a radiação solar é a principal energia de funcionamento dos respetivos mecanismos. Neste capítulo é também apresentado o princípio dos fornos solares e a respetiva tipificação tendo por base toda a informação recolhida. São ainda apresentados os indicadores de desempenho e a distribuição geográfica dos vários estudos realizados.

No quarto capítulo, é apresentado um caso de estudo que consiste na construção de um dos fornos mais comuns e também dos mais testados. Com este caso de estudo pretende-se verificar o seu comportamento técnico e a viabilidade da sua utilização em Portugal.

O quinto capítulo, apresenta uma análise crítica da literatura consultada e os resultados obtidos de um forno solar tipo caixa ensaiado.

O sexto capítulo trata-se da conclusão onde se pretende dar resposta aos objetivos propostos na introdução e finaliza com a abordagem da viabilidade do forno contruído em Portugal.

Introdução

2. Metodologia de revisão

O presente estudo assenta na análise do potencial da radiação solar recebida pelo planeta terra, bem como, investigar várias configurações de fornos solares e também analisar os diferentes resultados obtidos.

Primeiramente o estudo de revisão bibliográfica, baseou-se na pesquisa de informação acerca do aproveitamento da radiação solar. Essa pesquisa foi efetuada no Portal RCAAP (Repositórios Científicos de Acesso Aberto de Portugal) e em bases de dados online como, Science Direct, Google Académico e B-on.

Primeiramente, foram pesquisadas as palavras-chave: radiação solar, aplicações da radiação solar, secadores solares, forno solar, eficiência térmica e viabilidade de um forno solar. Com a realização da pesquisa inicial e considerando-se as palavras-chave em inglês, foram obtidos 332486 estudos. Em seguida, foram avaliados os critérios de pesquisa para seleccionar os artigos para compor o estudo. Assim, foram descartados os seguintes estudos: artigos de jornal não indexados, revistas académicas/escolares; atas de congressos; recursos textuais; enciclopédias; e capítulos de livros. O resultado da filtragem indicou 272676 artigos científicos. Na etapa seguinte foi estabelecido um intervalo de tempo na base de dados para a definição da data de publicação dos estudos para o período de 2012 a 2023 resultando na obtenção de 180337 artigos científicos. De seguida, a opção passou por uma terceira seleção excluindo aqueles que não se enquadrassem na área de engenharia, ciência dos materiais e ciências do planeta. Desse modo, ficou-se com uma amostra de 119430 artigos. Posteriormente, foi efetuada uma seleção pela área científica, obtendo-se a totalidade de 12971 artigos. Procedeu-se a uma leitura do título e obteve-se no final uma amostra de 800 artigos científicos. Por ser necessário uma consolidação de conceitos e também por inexistência de pesquisas

Metodologia de Revisão

recentes acerca de temas em específico, foram adicionados 17 artigos fora do intervalo de tempo predefinido.

De seguida foram analisadas as publicações científicas e realizou-se a revisão acerca do potencial energético fornecido pela radiação solar, quer no setor da saúde, mais especificamente setor alimentar, como no setor de energia.

Finalmente realizou-se um estudo detalhado dos fornos solares projetados e testados, e subdividiu-se em dois grandes grupos: os fornos solares do tipo direto e indireto. Esta divisão baseia-se na forma como a radiação chega ao forno solar.

3. Revisão da literatura

Neste capítulo, encontra-se a revisão de literatura sobre a radiação e os fornos solares. São elencados outros pontos como: princípio de funcionamento do forno solar, tipos de fornos, índices de desempenho e áreas geográficas de estudos efetuados, que permitiram alavancar o estudo dos fornos solares.

Com todas as publicações científicas recolhidas, foi efetuada uma seleção tendo por base diversos fatores enumerados no capítulo anterior, para posterior análise dos estudos realizados sobre o tema em análise.

3.1. Energia solar

3.1.1. Radiação solar

O planeta Terra, à semelhança dos restantes planetas do sistema solar, gira em torno do sol, num período de 365,25 dias. (Bombelli et al., 2019; Knudson, 2003; Silva et al., 2010) O trajeto descrito pela terra em torno do sol é chamado de Plano Elíptico. Assim sendo a distância da Terra ao Sol não é sempre constante, sendo a distância média $1,496 \times 10^8$ km. Esta distância corresponde à unidade astronómica (AU) (Iqbal, 1983).

A radiação solar demora, aproximadamente 8 minutos e 20 segundos a percorrer a distância entre o Sol e a Terra, uma vez que é percorrida à velocidade da luz no vácuo sendo ela aproximadamente $3,0 \times 10^5$ km/s (Bombelli et al., 2019; Kalogirou, 2013).

Assim sendo, devido à forma elíptica da órbita do planeta Terra em torno do sol, esta distância situa-se no intervalo 0,983 a 1,017 AU. Pode ser observado, através da figura 1, o movimento da terra em relação ao sol e representação da declinação nos equinócios e solstícios. A declinação é 0° nos equinócios de primavera e outono, e toma o valor de

Revisão da Literatura

$\pm 23,45^\circ$ nos solstícios, positivo no solstício de verão e negativo no solstício de inverno (Kalogirou, 2013).

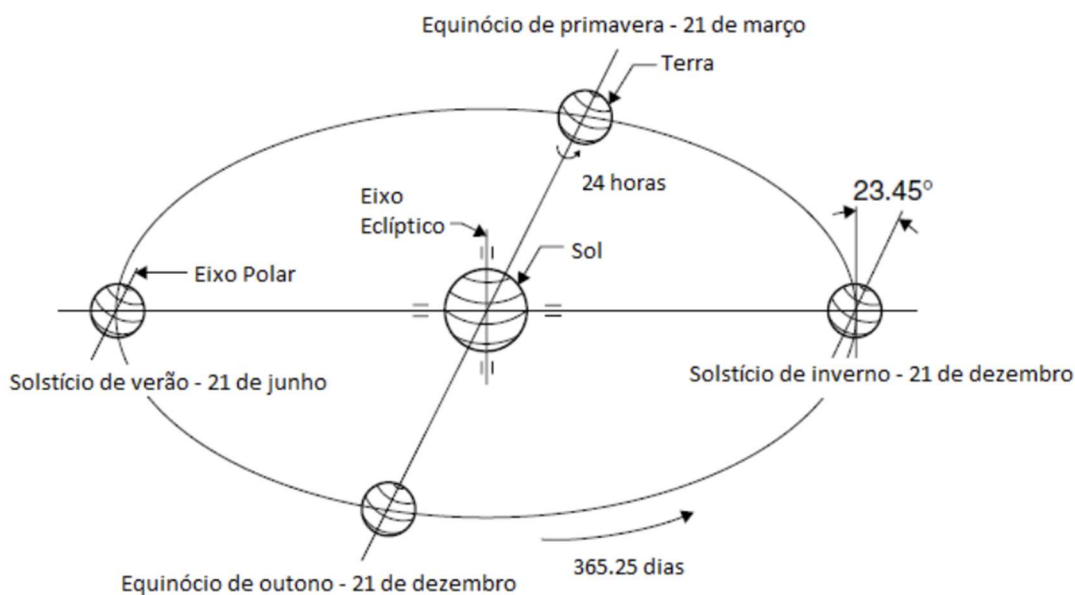


Figura 1: Movimento da Terra em torno do Sol – Fonte: (Bombelli et al., 2019).

O sol gera a sua energia através de uma reação de fusão nuclear de Hidrogénio, [que representa 74% da massa solar (Kalogirou, 2013)] originando Hélio. Esta reação leva o sol a libertar $3,8 \times 10^{20}$ MW de energia em todas as direções, o que representa um valor de 63 MW por cada metro quadrado de superfície do sol (Kalogirou, 2013).

Quase todas as formas de energia na Terra têm origem na radiação solar, quer seja através da conversão da energia solar em energia química - como por exemplo a madeira ou o petróleo produzidos direta ou indiretamente pela fotossíntese –, quer seja a conversão em energia cinética – por exemplo, o vento e as correntes oceânicas originados pelas diferenças térmicas em várias regiões do planeta. Estas diferenças térmicas são causadas em larga escala pela diferente exposição ao sol das várias regiões do planeta (Reboita et al., 2015).

A Radiação é uma fonte de energia que consiste numa mistura de radiações com comprimentos de onda distintos, visível através da figura 2:

Radiação ultravioleta – esta radiação representa 9% da energia total; como tem um comprimento de onda menor que o comprimento de onda da luz visível, não é perceptível

pelo olho humano; é considerada uma radiação energética, ou seja, é capaz de romper ligações químicas;

Radiação visível – é a que é perceptível pela visão humana, sendo que representa 42% da energia emitida pelo sol; possui a energia adequada para a realização de fotossíntese.

Radiação infravermelha – é a restante percentagem (49%) de radiação e o seu comprimento de onda é maior que o da radiação visível; não é perceptível pelo olho humano e como tem pouca energia só provoca agitação térmica, ou seja, aquece os corpos que estejam expostos a ela (Torres, 2021).

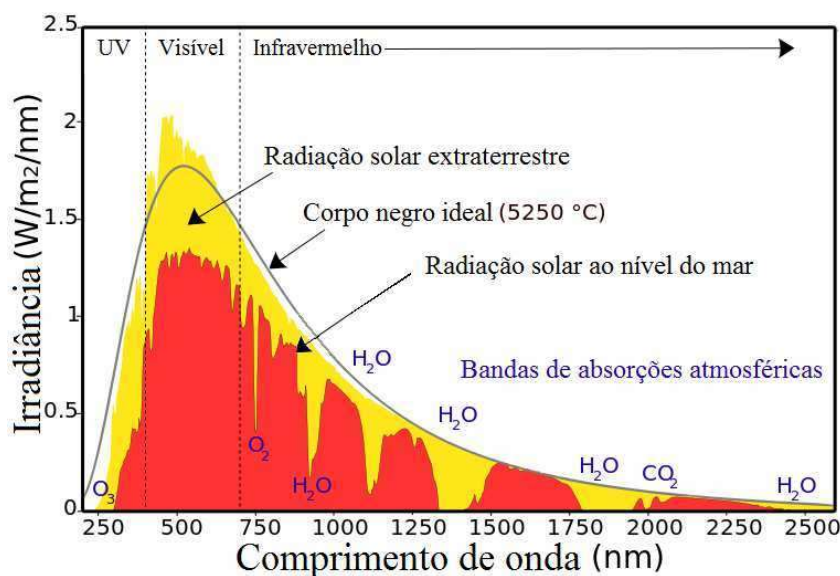


Figura 2: Espectro da Radiação solar Fonte: (F. H. Santos et al., 2015)

A exploração da radiação solar é de elevada importância pois pode ser aproveitada para diversas áreas como por exemplo, no setor energético, setor do agricultura, setor de processamento de alimentos (Boriskina et al., 2015; Dong et al., 2020; Lam et al., 2008; Tymvios et al., 2005; Y. Zhou et al., 2021).

3.1.2. Potencial solar

A irradiação solar que alcança a superfície terrestre pode ser observada na figura 3, apresentando os valores totais diários e anuais que dependem da localização geográfica. Este estudo é necessário pois com ele é possível inferir quais locais onde essa energia disponibilizada pelo sol poderá ser aproveitada de forma mais eficiente (*The World Bank, Global Solar Atlas 2.0, Solar Resource Data: Solargis, 2020*).

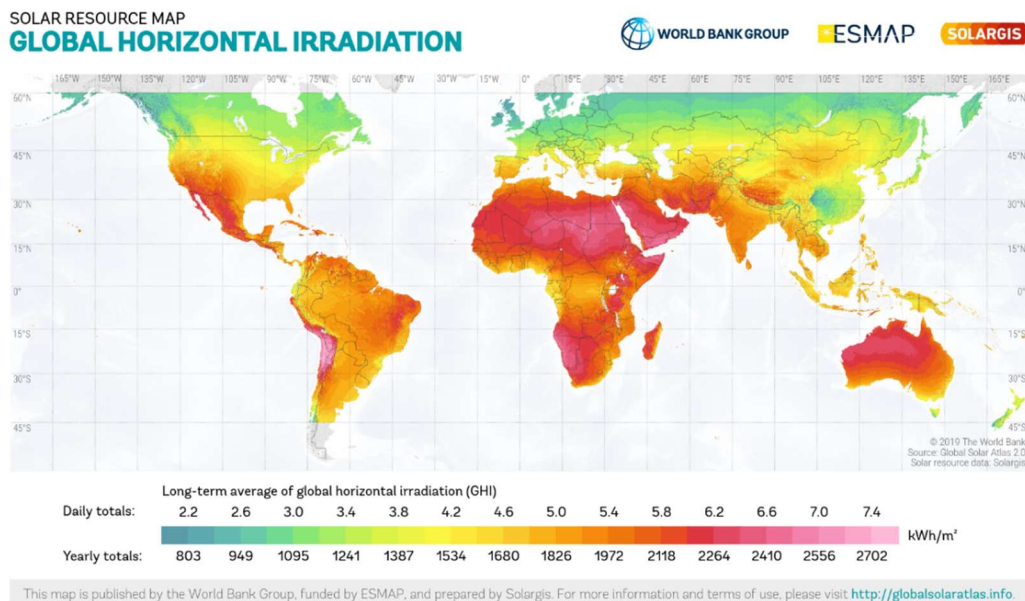


Figura 3: Irradiação global captada pela superfície terrestre Fonte (The World Bank, Global Solar Atlas 2.0, Solar Resource Data: Solargis, 2020)

No entanto, a radiação incidente na atmosfera terrestre é relativamente constante, sendo que, a mesma que chega à superfície terrestre varia consoante vários fatores. São eles os efeitos atmosféricos, variações na altimetria, variações de poluição, a sua latitude, a estação do ano, a data e a hora, entre outros.

Associado a este efeito é necessária uma compreensão dos movimentos da terra em relação ao sol. Identificar o movimento do sol em torno da terra é de extrema importância, para que seja possível realizar estudos onde radiação captada é a energia utilizada. Isto porque em diferentes alturas do ano teremos uma disponibilidade de radiação horária diferente (Barba et al., 2019; Gorjian et al., 2022; Hum, 2018; Panwar et al., 2012; Lentswe et al., 2021; Ahmed et al., 2020; Ferreira et al., 2018; Gao et al., 2022; Kabir et al., 2018).

A figura 4 mostra a irradiação em [kWh/m²] captada pelo território português.



Figura 4: Irradiação captada pelo território Português Fonte: (The World Bank, Global Solar Atlas 2.0, Solar Resource Data: Solargis, 2020)

Pode então notar-se na figura 4 que a região com maior disponibilidade de irradiação é a zona Sul pois está geograficamente mais perto da linha do equador. Devido à inclinação de $23,45^\circ$ do planeta, os raios solares são mais fortes no Equador (regiões muito quentes como África ou América do Sul) comparativamente com o Polo Norte e o Polo Sul (Agency, 2023; A. C. G. G. dos Santos & Machado, 2021).

A irradiação emitida pelo sol no topo da atmosfera é atenuada até chegar à superfície terrestre, através de processos de dispersão, reflexão e absorção na atmosfera. A atmosfera é constituída por vários gases, partículas em suspensão e de nuvens que interagem com a radiação solar no seu percurso até à superfície terrestre. Assim sendo, como a radiação é difundida pela atmosfera, esta componente é denominada de radiação difusa, sendo a remanescente denominada de radiação direta. A combinação destas duas componentes, totalizando a energia recebida pela superfície, designa-se radiação global. Neste sentido, a radiação solar que chega à superfície depende muito do estado da atmosfera. Assumindo uma atmosfera uniforme e não estratificada, a diminuição da

radiação pode ser considerada proporcional ao caminho percorrido, isto é, dependente do ângulo zenital solar, conforme ilustrado na figura 5.

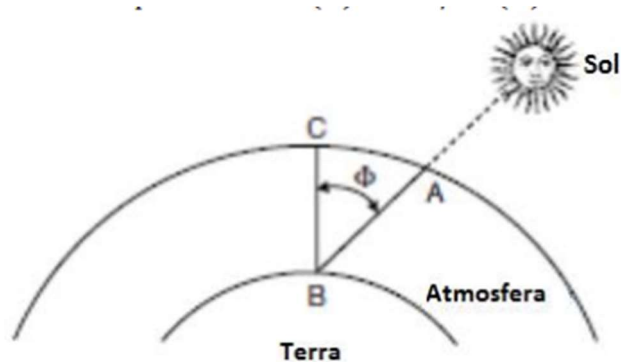


Figura 5: Altura da atmosfera – Fonte: (Kalogirou, 2013)

3.1.3. Aproveitamentos inovadores da energia solar

Existem inúmeros os estudos sobre o aproveitamento da irradiação solar captada pela terra.

Relacionado com a necessidade de conhecer o comportamento da irradiação solar no planeta, os dados de radiação solar são um requisito primário para quaisquer projetos, que contenham aplicações de energia solar, independentemente das respectivas localizações geográficas (Bailek et al., 2018). Neste sentido surge o estudo realizado por (Liao et al., 2022), que propõe elaborar um método simples e eficaz para estimar a irradiação solar que alcança a superfície terrestre, na China e na Austrália, com base em modelos de inteligência artificial (IA) usando dados meteorológicos, como a espessura das nuvens, a espessura de aerossóis, a radiação de céu limpo e dados de observação solar na Austrália e na China.

Atualmente existem três formas de estimativa de irradiação solar, são elas de forma:

- **Empírica** (Bailek et al., 2018; Makade et al., 2019);
- **Física** (Cogliani et al., 2007; Yeom et al., 2016; Zhu et al., 2020);
- **Modelos de IA** (Guermoui et al., 2020; Liao et al., 2022; Voyant et al., 2017; Y. Zhou et al., 2021).

A estimativa de irradiação solar de forma semi-empírica, surge pelo facto de não ser economicamente viável instalar instrumentos de medição em todos os locais possíveis. Segundo (Besharat et al., 2013) os modelos empíricos são baseados nos seguintes fatores:

- **Fatores astronómicos** (constante solar, distância da Terra ao Sol, declinação solar e ângulo horário);
- **Fatores geográficos** (latitude, longitude e elevação do local);
- **Fatores geométricos** (ângulo de azimute da superfície, ângulo de inclinação da superfície, ângulo de elevação do sol, ângulo de azimute do sol);
- **Fatores físicos** (dispersão de moléculas de ar, teor de vapor de água, dispersão de poeira e outros constituintes atmosféricos como O₂, N₂, CO₂, O, etc.);
- **Fatores meteorológicos** (radiação solar extraterrestre, duração da insolação, temperatura, precipitação, humidade relativa, efeitos da nebulosidade, temperatura do solo, evaporação, reflexão dos arredores, etc.).

Uma forma de medir a irradiação solar é através de medições do piranómetro. No entanto, para que possam determinar com precisão a radiação solar incidente nos locais desejados, o número de tais estações para medição é geralmente insuficiente para fornecer dados de radiação solar para as áreas desejadas, uma vez que a representatividade espacial é baixa (Yeom et al., 2016). Uma solução alternativa para este problema é usar um modelo físico para derivar irradiação normal direta, integrando dados de satélite. O uso de dados de satélite tem uma vantagem sobre dados de radiação de medições terrestres em termos de melhor cobertura temporal e espacial (Janjai et al., 2005; Zhang et al., 2014).

Por fim são usados os modelos de IA para previsão da irradiação solar na superfície da Terra (Guermoui et al., 2020). Este método consiste num método de inteligência artificial. Pode ser utilizado em diversos domínios e a vantagem deste método é que um modelo pode resolver problemas impossíveis de serem representados por algoritmos explícitos. Na irradiação solar a previsão dos modelos pode ser usada de três maneiras diferentes (Aggarwal & Saini, 2014):

- modelos estruturais baseados em outros parâmetros meteorológicos e geográficos;

Revisão da Literatura

- modelos de séries temporais que consideram apenas os dados historicamente observados de irradiação solar como características de entrada (previsão endógena);
- modelos híbridos que consideram tanto a irradiação solar quanto outras variáveis como variáveis exógenas (previsão exógena).

O estudo de (Fang et al., 2022), passa pela compreensão da influência da irradiação solar na geração de eletricidade através da evaporação da água. Como podemos ver na figura 6, é colocado um material poroso composto maioritariamente por fibra de vidro em contacto com a água. Esta apresenta uma estrutura porosa hidrofílica, a absorção de água é contínua. São então ligadas as extremidades com eléctrodos de pasta de carbono inerte. Assim sendo, com a ajuda da evaporação é induzida uma tensão de circuito aberto, com uma corrente em curto-circuito, e assim é obtida eletricidade induzida.

Este tipo de aplicação será exequível em lagoas ou em barragens pois, são de grande extensão e a evaporação da água pode ser aproveitada para criação de energia.

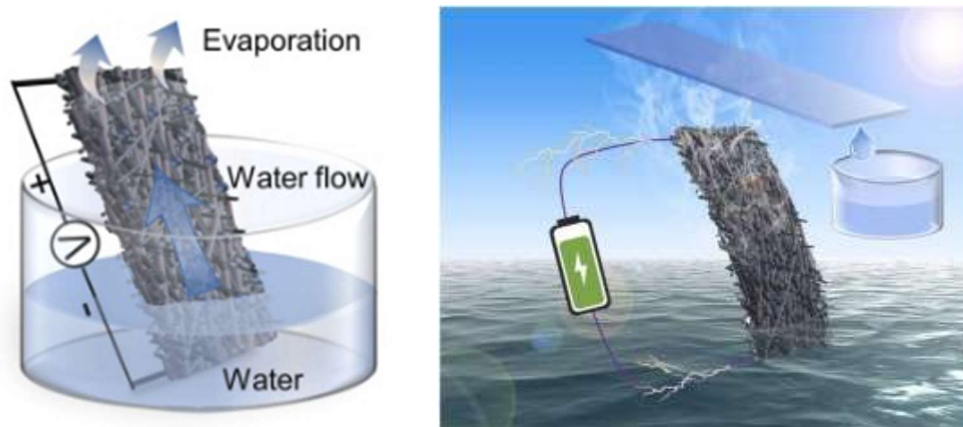


Figura 6: Esquema do estudo de geração de eletricidade a partir de evaporação de água.
Fonte: (Fang et al., 2022)

Os estudos desenvolvidos por (Chen et al., 2017; Fath et al., 2008; Huang et al., 2021; Mollahosseini et al., 2019; Sharon et al., 2022; Tao et al., 2018; Wu et al., 2021; Zhao et al., 2018; J. Zhou et al., 2019) investigaram um mecanismo que aumente disponibilidade de água doce para as atividades agrícolas, setor da saúde, industrialização e conseqüentemente o crescimento da população. O mecanismo utiliza a radiação solar de duas formas. Primeiro carrega uma bateria para que seja fornecida energia elétrica a uma resistência elétrica responsável por aquecer a água. Com o aquecimento da água e a conseqüente formação de vapor, começa assim a segunda forma de utilização da radiação solar. Com a formação do vapor, esse, ficará em contacto uma placa de vidro, e esse

contacto permite que seja atingindo o ponto de orvalho, originando assim gotículas de água e é assim direcionada para um reservatório onde a água é armazenada. Sendo assim é concluído o processo de destilação solar.

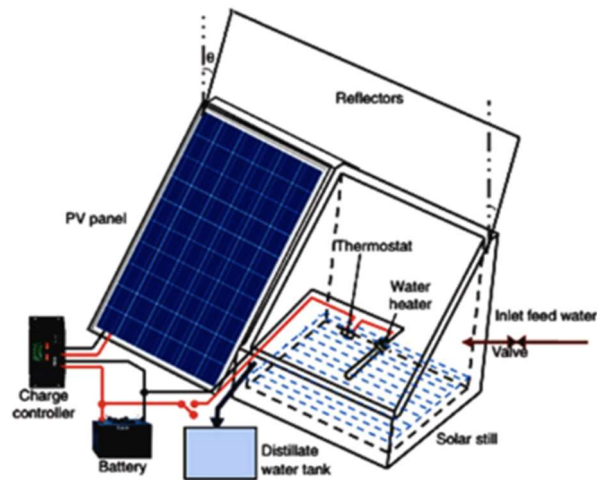


Figura 7: Destilador solar esquemático com aquecedor de água alimentado por módulo fotovoltaico
 Fonte: (Kabeel et al., 2021)

A tecnologia solar térmica, especificamente a evaporação impulsionada pela energia solar, é uma forma direta de obter energia solar para aplicações de aquecimento e armazenamento de energia. Este processo envolve a geração de vapor em temperaturas abaixo da ebulição (Tao et al., 2018).

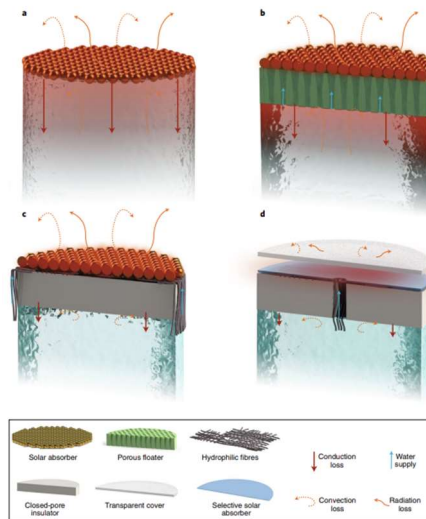


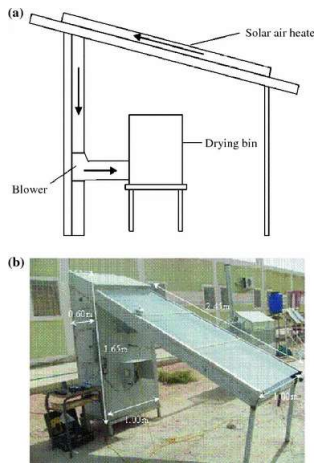
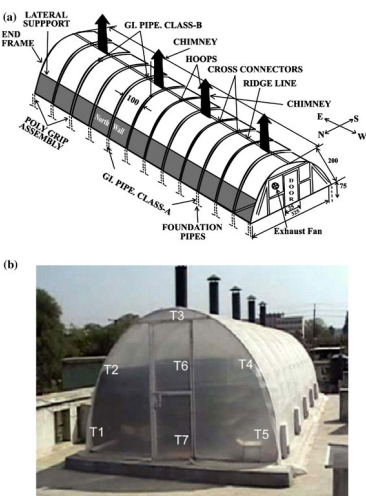

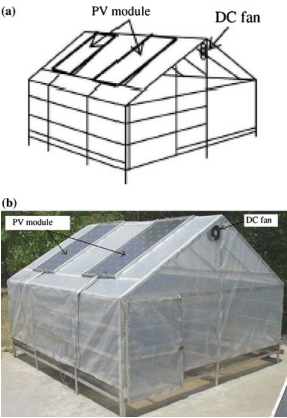
Figura 8: Projeto de isolamento térmico progressivo para um sistema de evaporação interfacial movido a energia solar. Fonte: (Tao et al., 2018)

A tecnologia de secagem solar surge como uma aplicação da radiação solar. Esta tecnologia é a técnica de preservação mais antiga de produtos agrícolas. A secagem ao sol ainda é amplamente utilizada para preservação de produtos agrícolas, no entanto é

Revisão da Literatura

fortemente utilizado nos trópicos e subtropicais, dada a abundância de radiação solar disponível. Existem duas grandes categorias de secadores solares, ativos e passivos. A diferença entre eles é a fonte de energia. Os secadores passivos apenas utilizam energia renovável e os secadores ativos utilizam energia não renovável, por exemplo, como fonte de calor suplementar e fonte para acionar o ventilador para circulação de ar pelo produto (Bala, 1998; Janjai & Bala, 2012).

De seguida podemos ver diversos exemplares de secadores utilizados em estudos científicos.

 <p>(a) Solar air heater Blower Drying bin</p> <p>(b) 1.60m 1.65m 1.00m</p> <p><i>Figura 9: Secador solar de convecção forçada para secagem de arroz. Fonte (Soponronnarit, 1995)</i></p>	 <p>(a) LATERAL SUPPORT END FRAME GL. PIPE, CLASS-B CHIMNEY HOOPS CROSS CONNECTORS RIDGE LINE GL. PIPE, CLASS-A FOUNDATION PIPES Exhaust Fan</p> <p>(b) T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7</p> <p><i>Figura 10: Secador de túnel solar tipo estufa de convecção natural. Fonte (Sastroamidjojo, M S.A., 1984)</i></p>
 <p><i>Figura 11: Secador solar tipo caixa comercializado na Tailândia. Fonte (Soponronnarit, 1995)</i></p>	 <p>(a) PV module DC fan</p> <p>(b) PV module DC fan</p> <p><i>Figura 12: Secador de efeito estufa híbrido fotovoltaico-térmico. Fonte (Barnwal & Tiwari, 2008)</i></p>

3.2. Princípio de funcionamento do Forno Solar

Conforme referido anteriormente, o forno solar é uma solução cada vez mais apresentada para problemas associados à sustentabilidade, no entanto, é um equipamento já há muito desenvolvido. É publicada uma investigação sobre fornos solares, pelo cientista suíço Horace de Saussure, sendo que o primeiro estudo realizado por Tschirnhausen (1651 – 1708), físico alemão. O estudo realizado por Tschirnhausen consistiu em utilizar uma lente grande para focalizar os raios de sol e ferver a água numa panela de barro. Horace de Saussure baseando-se no estudo de Tschirnhausen, chegou à conclusão que utilizando uma caixa de madeira, material com baixa condução de calor, conseguia ter temperatura suficiente para cozinhar frutas (Halacy & Halacy, 1992).

Mais tarde o cientista francês Ducurla aproveitou a ideia da caixa de madeira e acrescentou os vidros laterais para otimizar a concentração de calor, uma vez que permitem a reflexão da radiação solar, também isolou termicamente a caixa de madeira (Wentzel & Pouris, 2007).

Em 1959, a Fundação Ford, através da cientista americana Maria Telkes, teve a iniciativa de projetar um forno solar de baixo custo para aplicar a países tropicais áridos, de forma a garantir uma melhor confeção de alimentos para as populações envolvidas. O forno consistia numa caixa triangular com 30° com a horizontal e com o auxílio de 4 refletores de forma a igualar o efeito de um forno do tipo parabólico. Por fim, na sua cobertura continha um vidro duplo (Maria Telkes, 1959).



Figura 13: Demonstração do forno solar pela cientista Maria Telkes. Fonte: (Halacy & Halacy, 1992)

Revisão da Literatura

Segundo Harmim, (2014) a confecção de alimentos através da radiação solar, é simplesmente, utilizar a energia proveniente do sol para aquecer e cozinhar os alimentos, para consumo e será necessário ter em atenção três etapas:

- Obtenção da radiação solar;
- Conversão da radiação em calor;
- Retenção do calor e transmissão para o recipiente que contem os alimentos no seu interior.

Para que as três etapas sejam asseguradas é necessário utilizar um forno com um bom isolamento, um interior pintado de preto, pois absorve melhor a radiação. De forma que funcione em aproximação a um corpo negro, sendo esta a denominação da superfície idealizada que emite a taxa máxima de radiação segundo a lei de Stefan-Boltzmann (Çengel & Ghajar, 2012).

3.3. Tipos de Fornos Solares

Atualmente existem várias configurações de fornos solares com o objetivo de otimizar a confecção de alimentos. No presente estudo é realizada a divisão em dois grandes grupos, são eles, fornos solares do tipo direto em que a transferência de calor ocorre diretamente para o interior do forno e do tipo indireto, em que a energia é transferida para o interior do forno através de mecanismos exteriores ao próprio forno, como por exemplo, os fornos que utilizam como captadores da radiação, os coletores solares (Geddami et al., 2015; Herez et al., 2018; A. C. M. Tavares, 2018).

Na tabela 1 pode ver-se como foi estabelecida a divisão de fornos.

Tabela 1: Classificação dos Fornos Solares

Forno Solar									
Indireto					Direto				
Coletor Solar			Armazenamento de Energia		Concentração		Painel Solar	Caixa	
Parabólico	Tubos com Vácuo	Placa Plana	Latente	Sensível	Luz em Cima	Luz em Baixo		Com Refletor	Sem Refletor

3.3.1. Forno solar direto

Os fornos solares do tipo direto consistem em fornos que utilizam a radiação solar diretamente do sol para a panela com os alimentos. A sua principal vantagem é o seu baixo custo de produção, pois não é necessário recorrer a materiais dispendiosos. A principal desvantagem é que o forno solar só consegue estar em funcionamento quando está perante a radiação solar.

3.3.1.1. Forno solar direto com caixa sem refletor

O forno solar com caixa sem refletor consiste numa caixa isolada com vidro simples ou duplo transparente, sendo também utilizado plástico para o mesmo efeito, como se pode ver nas figuras 14 e 15. A radiação solar passa pelo vidro transparente e é absorvida pelos utensílios de cozinha, pelas paredes e pelo fundo do forno. Para além disso, os fornos tipo caixa têm maior fiabilidade pelos materiais utilizados aquando da sua construção. A eficiência térmica mantém-se estável (em dias semelhantes) se o forno tiver uma boa manutenção (Cuce, 2018; Herez et al., 2018).

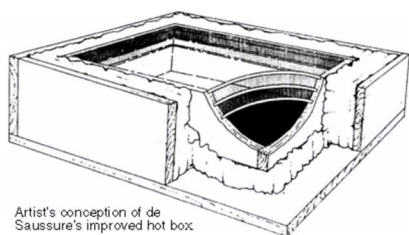


Figura 14: Forno de Horace de Saussure.
Fonte (Horace De Saussure and his hot boxes of the 1767, 2002)

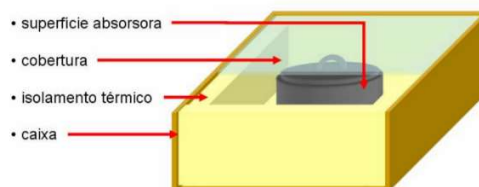
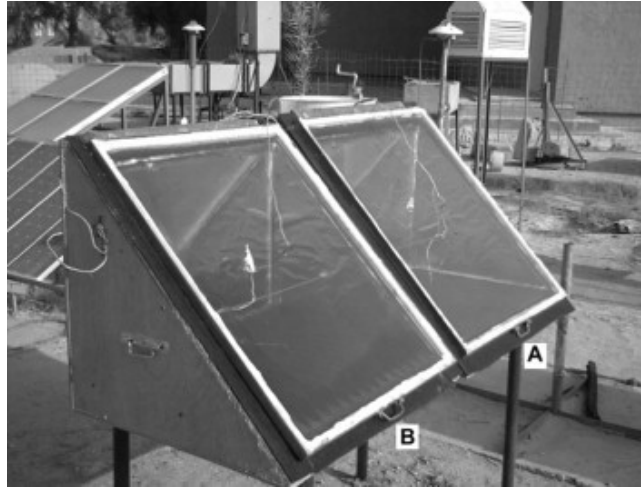


Figura 15: Constituição do forno solar.
Fonte: (Gomes, 2004)

No estudo realizado por Arezki Harmin, foram colocadas no interior da caixa de madeira camadas de casca de tamareira como isolamento térmico e são forradas com folhas de alumínio (figura 16). A tampa consiste num vidro de 1,5 cm de espessura inclinado a 45°. No que diz respeito aos resultados pode afirmar-se que a temperatura máxima da superfície em contacto com a panela chegou aos 129,4 °C às 11:00 da manhã, ou seja 2,5 h após o início do ensaio (Harmim et al., 2010).



*Figura 16: Fornos utilizados no estudo acima descrito
Fonte: (Harmim et al., 2010)*

O estudo desse autor inclui ainda a análise da utilização de uma placa absorvedora no interior do forno B.

3.3.1.2. Forno solar direto com caixa e com refletor

Neste tipo de forno, o fator diferenciador é a utilização de refletores, pois permite um melhor foco de radiação incidente no utensílio a ser utilizado para a confecção dos alimentos. Com este mecanismo, a eficiência térmica aumenta uma vez que a captação da radiação é maior. É importante ter em conta que, quanto maior for o número de refletores, maior é a energia absorvida por parte do forno solar (Chakma et al., 2021; Khatri et al., 2021).

Um possível exemplo para este tipo de forno é o forno SUNTASTE com fabrico em Portugal que apresenta uma estrutura em cortiça onde apenas a base é de alumínio. A sua tampa tem uma inclinação de 17° , para evitar uma acumulação de condensação e assim permitir que a radiação entre para o interior do forno. O teste foi realizado no dia 15 de novembro do ano de 2017, sendo que a radiação não ultrapassou os 600 W/m^2 .



Figura 17: Forno solar SunTaste 200
Fonte: (A. Tavares et al., 2018)

Os resultados foram bastante positivos pois foram atingidas temperaturas nas superfícies acima dos 100 °C após 45 minutos de ensaio. No que diz respeito ao ensaio com água, o tempo que a mesma demora a passar da temperatura ambiente à temperatura de ebulição é superior a duas horas (A. Tavares et al., 2018).

3.3.1.3. Forno solar direto painel solar

Este forno, usualmente, tem como matéria-prima cartão ou papelão. Sendo posteriormente revestido com folha de alumínio, com o objetivo de obter uma superfície refletora para o recipiente de cozinha. Uma vez que o utensílio deve estar pintado de preto, ele funciona como superfície absorvedora da radiação solar (Cuce, 2018; Herez et al., 2018).

Uma solução deste tipo foi apresentada em Rio Grande Do Norte no Brasil, local onde a temperatura média anual máxima, é aproximadamente 36 °C esta solução tem a principal característica de ser bastante económica. Os testes realizados foram na base de confeção de alimentos, tais como: cenoura, beterraba e chuchu, tendo sido obtidos tempos de cozedura de 2 h 56 min., 2 h 35 min. e 1 h 48 min., respetivamente. Comparativamente a outros tipos de fornos estes resultados foram algo decepcionantes, uma vez que parte da energia recebida constatou-se ser dissipada para a envolvente, por não haver um bom mecanismo de absorção e isolamento. Outro fator a ter em consideração é a condição atmosférica, que neste caso, não foram as ideais (Faustino Neto & Guerra, 2020).



*Figura 18: Forno solar do tipo painel solar
Fonte: (Faustino Neto & Guerra, 2020)*

3.3.1.4. Forno solar direto concentração luz em baixo

O forno foi colocado de forma a focar a radiação para baixo do recipiente. A vantagem que estes fornos solares oferecem é que são conseguidos resultados rapidamente este caso conseguiu-se em 40 min. atingir a temperatura de 95,1°C, sendo a temperatura média ambiente de 38,63°C e com uma irradiação média de 664 W/m², resultados de 40 minutos de ensaio (Das et al., 2019).

Analisando fornos de concentração de calor, chega-se à conclusão de muitas semelhanças com o forno anterior, isto porque não dispõe de isolamento e as suas superfícies são refletoras da energia para o tacho com os alimentos (Herez et al., 2018). Este caso o forno apresentado é classificado como paraboloide, tendo uma abertura de 1,54 m² e a sua estrutura é revestida a filme de alumínio anodizado com 85 % de refletividade. O utensílio de cozinha utilizado foi um tacho previamente pintado com tinta preta fosca com uma área externa de 0,212 m².



*Figura 19: Forno solar com concentração de radiação em baixo
Fonte: (Das et al., 2019)*

3.3.1.5. Forno solar direto concentração luz em cima

A principal diferença para o exemplo anterior é simplesmente o ponto de focagem da radiação, sendo ele para cima do utensílio de cozinha (Herez et al., 2018).

Neste estudo, foi utilizado um utensílio com $1,18 \text{ dm}^3$ dentro de um saco PET de confeção de alimentos de forma a agilizar o respetivo processo, diminuindo assim algumas perdas para o exterior. Este utensílio foi colocado no centro do forno solar parabólico e a sua orientação era ajustada a cada 20 min.

Sendo a média das temperaturas ambientes cerca de $33,1 \text{ }^\circ\text{C}$, com uma irradiação média de $769,95 \text{ W/m}^2$, atingiu-se a temperatura $98,64^\circ\text{C}$ ao fim de 2 horas.



Figura 20: Forno solar com concentração de radiação em baixo

Fonte: (Regattieri et al., 2016)

3.3.2. Forno solar indireto

Abaixo é apresentada a classificação dos fornos solares do tipo indireto, que consistem em fornos que armazenam a radiação solar numa primeira fase para só de seguida a encaminhar para o forno solar. A sua principal desvantagem é o custo de produção, pois é necessário recorrer a materiais complexos que permitam o armazenamento eficiente de energia. A principal vantagem é que este forno solar pode estar em funcionamento quando há radiação solar disponível.

3.3.2.1. Forno solar indireto com armazenamento de energia na forma sensível

Revisão da Literatura

Os tipos de fornos solares indiretos não usam diretamente a radiação para o utensílio. Primeiramente é aquecido um material, quer na forma de um sólido ou líquido e só a seguir é que o calor é transferido para o forno solar. Este desenvolvimento acrescenta valor ao produto final, tendo em conta que é necessário o recurso a materiais que não estavam a ser utilizados (Nahar, 2003; Panchal et al., 2019).

Os materiais que têm por finalidade armazenar a energia são as pedras pretas, pedras de sauna e granito da Lapónia. O aquecimento de um sólido ou líquido, que não mude de fase é denominado de armazenamento de calor sensível.

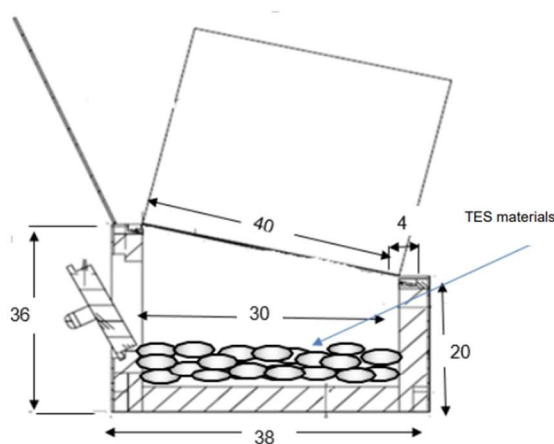


Figura 21: Forno solar indireto com armazenamento de energia na forma sensível onde TES (thermal energy storage)

Fonte: (Solomon, 2014)

Na fase experimental deste estudo foi medida a temperatura do interior do forno com e sem armazenadores de energia, tendo-se constatado um ligeiro atraso na descida da temperatura quando o forno deixou de receber radiação. Passadas 3 horas após o início das descidas das temperaturas conseguiu-se atingir um diferencial de temperaturas entre os fornos de 20°C (Solomon, 2014).

3.3.2.2. Forno solar indireto com armazenamento de energia na forma latente

Para muitos autores os materiais de armazenamento de calor latente (PCM- *Phase Change Materials*) são melhores e mais compactos quando comparados com materiais de armazenamento de calor sensível (Panchal et al., 2019; Sharma et al., 2000; Zalba et al., 2003). O aquecimento de materiais que impliquem a mudança de fase denominam-se

Revisão da Literatura

por aquecimento latente e é a situação descrita no estudo realizado na Índia, (Sharma et al., 2000) tendo sido utilizado 2 kg de acetamida para fazer o armazenamento de energia.

O conceito centra-se na absorção de energia durante o dia e durante a noite é conseguido tirar aproveitamento da energia desperdiçada, pela acetamida na mudança de fase, para a confeção de alimentos.

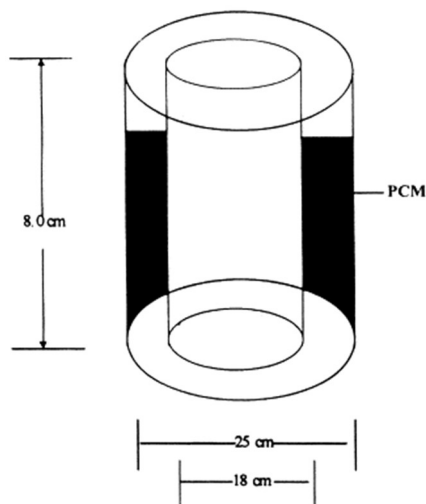


Figura 22: Diagrama esquemático da unidade de armazenamento de calor latente.
Fonte: (Sharma et al., 2000)

A fase experimental centrou-se na colocação de 0,10 kg arroz com água às 11 h e retirado 3 horas depois e verificou-se que estava perfeitamente cozido. De seguida, colocou-se as mesmas quantidades de água e arroz às 16 h e foram retirados 35 minutos depois com o arroz perfeitamente cozido. Por fim, foi feito um terceiro teste às 18 h com a adição de 0,15 kg de arroz e 0,25 kg de água, foi verificado o estado de cozedura 50 minutos depois e verificou-se que o arroz estava cozido.

Com este teste é possível verificar que a adição de elementos que possibilitem o armazenamento de energia é uma mais-valia para confeccionar comida por mais que uma vez, e mesmo sem radiação (Sharma et al., 2000).

3.3.2.3. Forno solar indireto com coletor solar na forma de placa plana

Esta configuração permite que o forno esteja dentro de casa e o recetor de energia esteja no seu exterior, pois a energia é transportada pela água do coletor solar. O projeto de (Sharma et al., 2005) utilizou a mesma configuração. No entanto, o acréscimo de um

reservatório que permite que seja possível a confecção de alimentos em momentos sem radiação disponível.

Uma vez que existe o transporte de energia para o interior do forno, este processo só ocorre com a inclusão de material que permita algum armazenamento de energia. Para este caso utilizou-se o material com armazenamento de energia na forma latente, como é possível ser observado na figura 22.

Este projeto realizou testes de confecção de uma refeição para o almoço e uma refeição para o jantar. Com esta configuração foi possível obter temperaturas mais elevadas por mais tempo tendo em conta que a água do coletor não esteve abaixo dos 70°C. Isto, permite atenuar as quebras das temperaturas quando deixa de receber radiação.

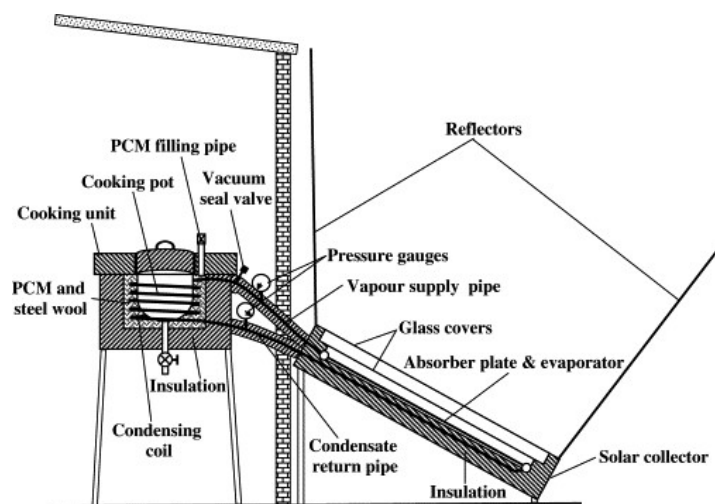


Figura 23:Forno solar indireto com coletor solar na forma de placa plana
Fonte: (H.M.S et al., 2008)

Chega-se à conclusão que é uma boa configuração para confecção de alimentos que necessitem de uma temperatura mais baixa durante mais tempo, como por exemplo o feijão, que é o alimento muito usado no Egito para o pequeno-almoço, local onde foi realizado o estudo (H.M.S et al., 2008).

Estes resultados confirmam que o fogão pode ser utilizado para cozinhar diferentes refeições no período das 13 h da tarde às 22 h da noite.

3.3.2.4. Forno solar indireto com coletor solar na forma de tubos com vácuo

Diversos autores partilham a opinião que coletores que utilizem tubos de vácuo têm melhor eficiência em baixas temperaturas e também no que diz respeito ao isolamento (Kalogirou, 2004; Morrison et al., 2004; Sabiha et al., 2015).

Neste tipo de forno é utilizado um coletor com um tubo de vácuo que aquece um óleo e este, por sua vez, irá aquecer uma panela que se encontra dentro do forno. O objetivo deste projeto era obter elevadas temperaturas por volta dos 200°C, objetivo esse que foi cumprido com sucesso. Foi utilizado um óleo para este estudo por ter o ponto de ebulição extremamente elevado. Com 1 hora de ensaio o óleo chegou aos 198°C.

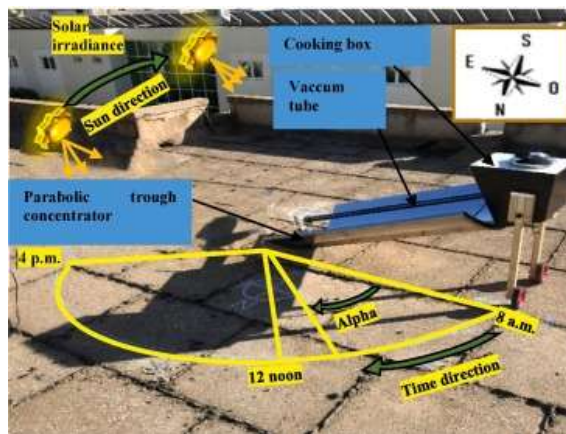


Figura 24: Forno solar testado em laboratório em Marrocos.
Fonte: (El Moussaoui et al., 2020)

3.3.2.5. Forno solar indireto com coletor solar na forma parabólica composta

Este último projeto, aposta numa configuração que utiliza uma forma parabólica que foca a radiação numa placa absorvedora de energia, que é constituída por uma placa de aço inoxidável pintada com uma cor preta fosca. Por sua vez a superfície traseira e dianteira do forno permite uma elevada concentração de radiação solar. Este projeto foi desenhado para equipar as casas em que o forno se encontra das mesmas e apenas os espelhos e a placa absorvedora estão no exterior das casas.

Revisão da Literatura

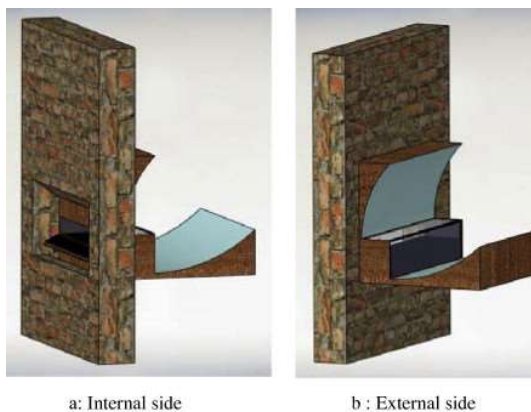


Figura 25: Esquema de instalação em habitação familiar



Figura 26: Imagem do forno testado

Fonte: (Harmim et al., 2013)

Esta configuração permite mostrar o efeito dos refletores pois foi colocada água num tacho e demorou mais 2 h para atingir a temperatura de ebulição, com o forno sem os refletores. O efeito da placa absorvedora é conseguir garantir durante mais tempo, temperaturas mais altas.

Posto isto esta configuração oferece ao utilizador maior rapidez de aquecimento e prolonga temperaturas mais altas num intervalo de tempo maior (Harmim et al., 2013).





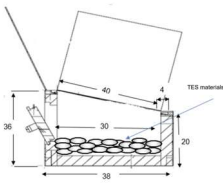
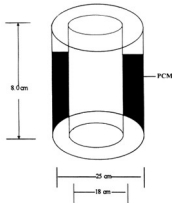
3.4. Indicadores de desempenho

Com este subcapítulo pretende-se esquematizar, através da tabela 2, os índices de desempenho de cada tipo de forno, uma vez que, para diferentes utilizadores, existem diversos fatores a serem tidos em conta, como por exemplo o custo, os resultados, a portabilidade, a capacidade de confeccionar uma ou mais refeições.

Tabela 2: Indicadores de desempenho dos variados tipos de fornos.

Vantagens	Imagem do tipo de forno	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Materiais de baixo custo • Temperatura do ar (125°C) 		<ul style="list-style-type: none"> • Captação da Radiação.

Revisão da Literatura

<ul style="list-style-type: none"> • Maior capacidade de concentração a radiação solar • Capacidade de melhorias e adaptações • Temperatura do ar 171°C • Custo 		<ul style="list-style-type: none"> • Transporte do equipamento
<ul style="list-style-type: none"> • Portabilidade • Baixo Custo 		<ul style="list-style-type: none"> • Baixa temperatura (73°C) • Tempo elevado de confeção
<ul style="list-style-type: none"> • Poucos materiais utilizados • Temperatura do forno 146°C 		<ul style="list-style-type: none"> • Portabilidade • Perdas térmicas para a envolvente
<ul style="list-style-type: none"> • Portabilidade • Baixo custo 		<ul style="list-style-type: none"> • Perdas térmicas para a envolvente • Temperatura de 98.64°C
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura do forno 150°C • Sem irradiação solar, num intervalo de 3h apenas apresenta um $\Delta T=20[^\circ C]$ 		<ul style="list-style-type: none"> • Portabilidade
<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de cozinhar durante a noite • Confeção se arroz entre as 18h e 18:50. 		<ul style="list-style-type: none"> • Elevado custo • Portabilidade

<ul style="list-style-type: none"> • Obtenção de temperaturas altas num intervalo de tempo maior • Forno deslocado do espaço de captação de energia 		<ul style="list-style-type: none"> • Elevado custo • Ajuste do posicionamento
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura do forno 200°C 		<ul style="list-style-type: none"> • Elevado custo • Ajuste do posicionamento
<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade de instalação no interior de uma habitação 	<p>a: Internal side b: External side</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado custo • Adaptação com o edifício

3.5. Área Geográfica dos Estudos Efetuados

Com o auxílio do gráfico 1 pretende-se apresentar a localização dos principais estudos considerados sobre o tema. Na sua totalidade são 80 estudos, em que se analisaram diferentes configurações de fornos solares e desenvolveram tecnologias com o objetivo de melhorar o seu rendimento.

Recordando a figura 1, que diz respeito á irradiação global captada pela superfície terrestre, concluímos que em zonas onde a irradiação solar é mais abundante ainda não existem muitos estudos acerca do tema. Simultaneamente essas regiões são menos desenvolvidas e carecem de alternativas mais económicas que possam dar a população mais qualidade de vida. De notar que são também regiões que apresentam grande disponibilidade de radiação solar, atualmente subaproveitada.

Dar a oportunidade aos mais desfavorecidos de terem fornos solares, possibilita, melhoramento na saúde e bem-estar, melhor qualidade na confeção dos alimentos, energia limpa e acessível, redução das desigualdades, erradicação da pobreza, sendo que estes são alguns dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável estabelecidos pelos 193 Estados membros da ONU.

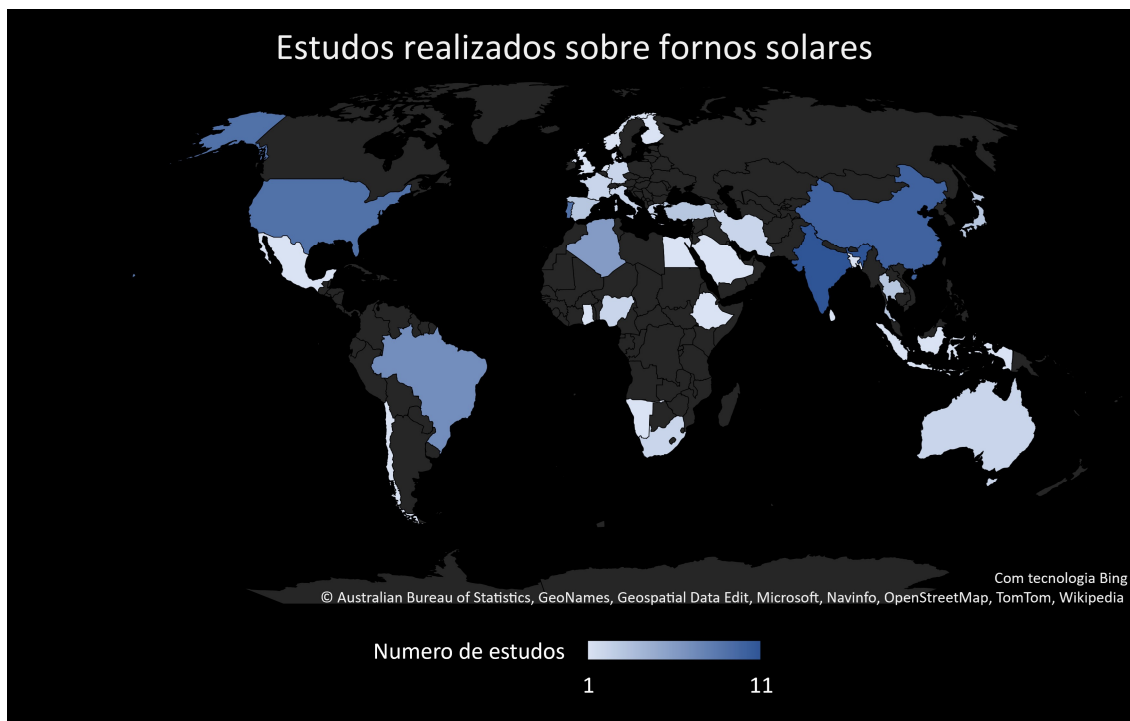


Gráfico 1: Distribuição geográfica de estudos sobre fornos solares.

4. Caso de Estudo

No caso em estudo, testou-se a capacidade de confeccionar alimentos num forno solar tipo caixa e avaliou-se a sua eficácia da sua utilização em Viseu. O forno solar foi colocado no telhado da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu para que a radiação solar não fosse obstruída em nenhum período ao longo do dia.

Ao longo do projeto foram desenvolvidos vários testes no forno solar. No somatório realizaram-se 23 tipos de testes distintos, alguns repetidos em dias distintos para depois servirem de comparação. Os dados dos testes foram recolhidos através do software do Pico Technology.

Primeiramente realizaram-se testes padronizados sem efetuar alterações. Isto é, o forno era orientado horariamente, segundo a posição solar, desde as 9 h até às 18 h. Nestes testes apenas se pretendia verificar quais as temperaturas atingidas pelas várias superfícies onde se encontravam os termopares.

Aos testes padronizados foram adicionadas duas placas de aço com 5 kg cada uma. Este tipo de teste serviu para estudar a influência da adição de material que acumulasse energia e permitisse que as temperaturas do forno fossem mais estáveis no caso de o céu ficar nublado durante o dia.

De seguida, realizaram-se testes para analisar as perdas pelo vidro frontal do forno. Esses testes consistiram em isolar o vidro frontal a diferentes horas do dia e verificar quais as alterações sofridas nas temperaturas. As horas a que se tapou o vidro frontal foram às 11 h da manhã, 13:30 h da tarde e 16 h da tarde.

Caso de Estudo

Para averiguar a necessidade de ajuste do espelho vertical que era orientado sempre que o forno também se movimentava, fez-se um teste padronizado em que o espelho não foi ajustado durante todo o dia, ficando na vertical.

Após realizados testes para verificar as temperaturas atingidas nas várias superfícies do forno, iniciaram-se os testes com uma panela que continha 2 litros de água para verificar se atingia o ponto de ebulição. Este tipo de teste foi repetido com a utilização das bases de aço e com isolamento do vidro frontal com lã de rocha e chapa de zinco.

Os restantes testes foram para confeccionar alimentos. Conseguiu-se cozinhar arroz, brócolos e bolo de chocolate.

4.2.1. Procedimento

Para a elaboração dos testes seguiu-se os seguintes procedimentos começava-se o dia orientando o forno de acordo com a posição solar e era realizada a ativação dos meios digitais para obtenção das temperaturas. Posto isto dava-se início aos testes e procedia-se à reorientação do forno de hora a hora, com ajuste do espelho que estava a refletir a radiação para o interior do forno.

Os testes finalizavam com o horário do por do sol, recolhia-se os dados disponibilizados pelos softwares apropriados para o efeito, tratava-se os mesmos e planeava-se os testes para o dia seguinte, tendo em conta, as condições climáticas, sendo este o ponto mais difícil de controlar pois o objetivo passava por testar vários dias com as condições climáticas idênticas para ser feita uma comparação mais aproximada.

4.2.2. Aquisição de Dados

Os dados eram tratados pelos softwares apresentados a seguir.

Caso de Estudo

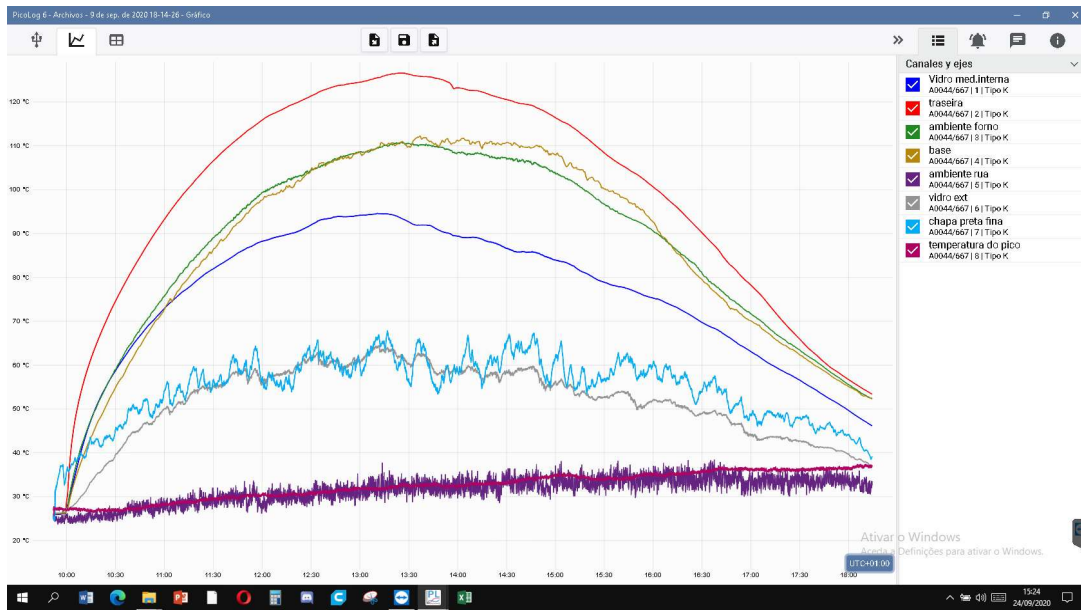


Figura 27: Ambiente de trabalho do Software PicoLog 6

Na Figura 27 é demonstrado o ambiente de trabalho do Software PicoLog 6, programa esse que recolhia os dados cedidos pelos termopares tipo K a cada 10 segundos, estrategicamente colocados no forno solar desenvolvido. Como se pode constatar na mesma figura, cada linha de coloração diferente, indicava a temperatura de sítios distintos.

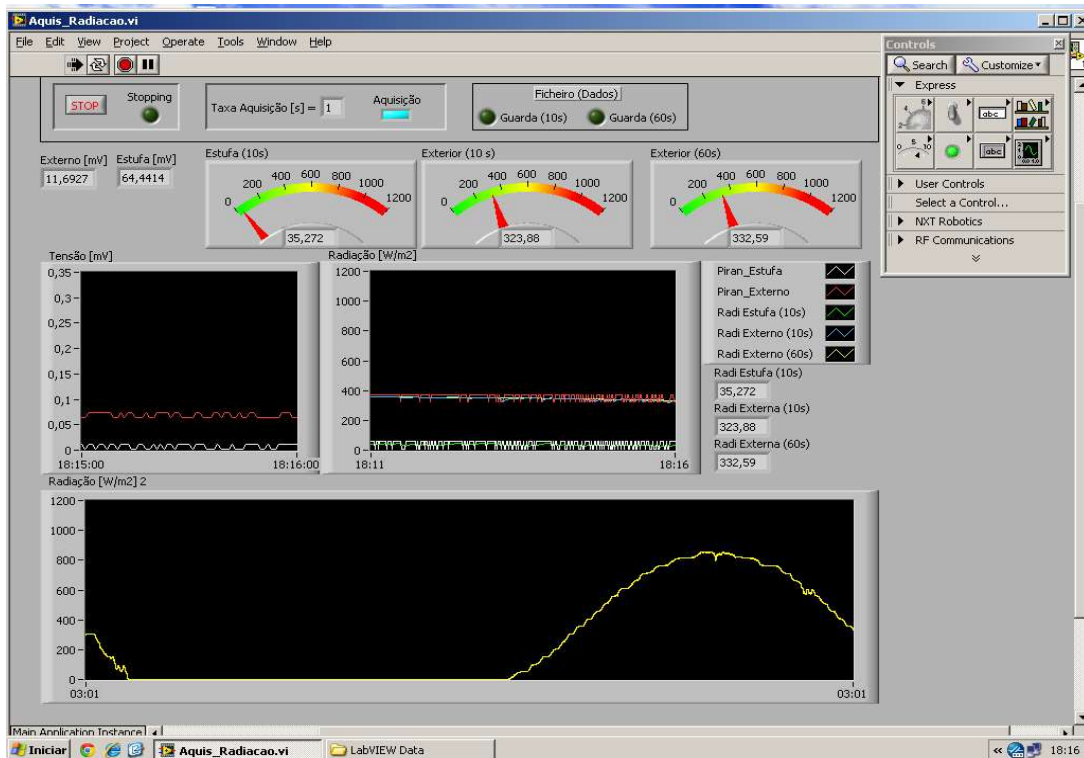


Figura 28: Ambiente de trabalho do Software LabVIEW

Caso de Estudo

Na figura 28, é possível verificar o ambiente de trabalho do Software LabVIEW, onde a linha de coloração amarela demonstra a radiação obtida a partir de um piranómetro colocado perto do forno solar de forma a indicar com maior rigor a energia captada pelo mesmo a cada 10 segundos.

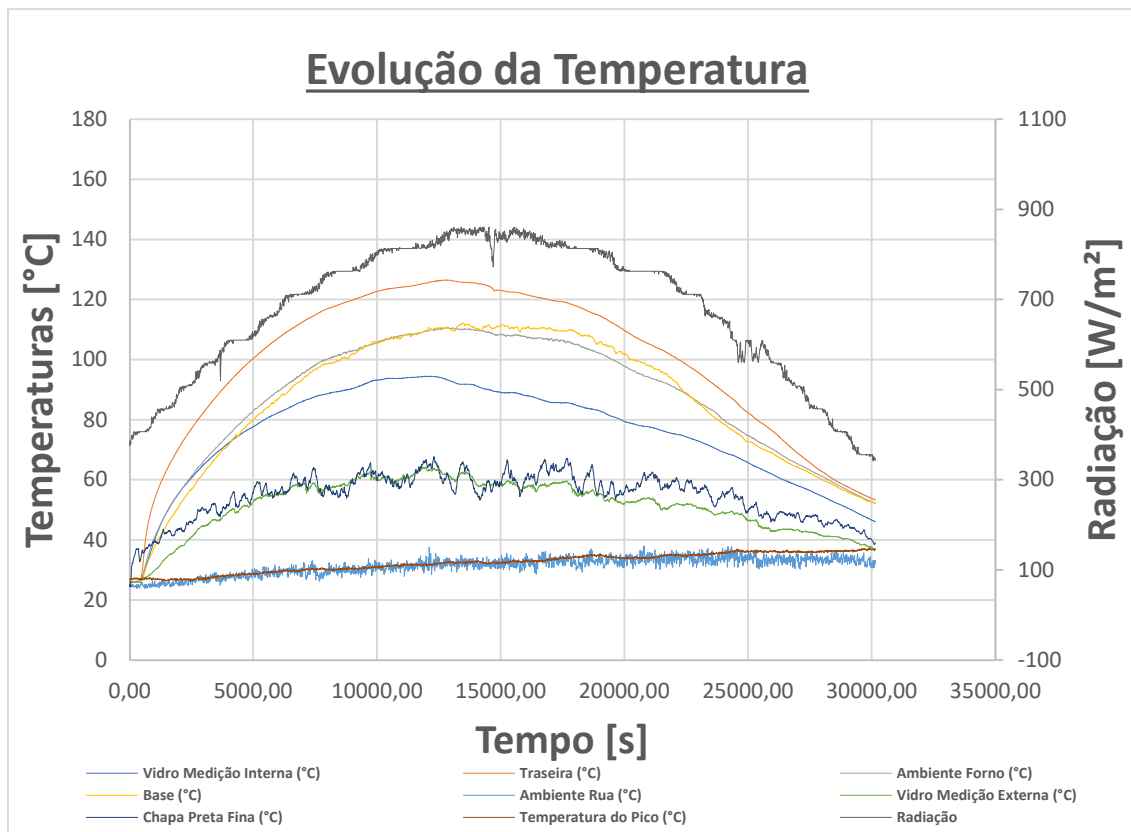


Figura 29: Ambiente de trabalho da Folha de Calculo Excel

Com a figura 29 é apresentada a assemblagem dos dados recolhidos pelos softwares anteriormente apresentados e tratados em folha de calculo Excel, sendo a linha de coloração preta responsável por indicar a radiação captada. A sua escala em [W/m²] é apresentada no lado direito do gráfico. Todas as outras linhas traduzem as temperaturas em [°C] captadas pelos termopares. A escala das mesmas é apresentada no lado esquerdo do gráfico. Todos os dados recolhidos com intervalos de tempo de 10 segundos, escala apresentada no limite inferior do gráfico em [s].

4.2.3. Procedimento de aferição da eficiência instantânea

Caso de Estudo

Com base nas temperaturas obtidas nas faces onde existe vidro, ou seja, as faces onde há mais perdas de energia para o exterior, foram calculados os ganhos e as perdas térmicas. Estes testes serviram para quantificar o desempenho do forno solar em estudo, com base nos dias testados e nos resultados obtidos e também de acordo com as condições climáticas semelhantes.

Os resultados obtidos foram analisados para os dias 25, 28 e 29 de setembro e 9 de outubro.

A água foi um fator determinante para o cálculo da eficiência, tendo em conta que a partir dela conseguimos calcular o calor recebido utilizando a 1ª Lei da Termodinâmica.

A Potência Solar foi obtida através da seguinte equação:

$$1) PS_t = \frac{Rsa_{t+300} - Rsa_{t-300}}{600} [W]$$

Onde:

PS_t - Potencia Solar no instante t [W]

Rsa_{t+300} - Radiação acumulada até ao instante t+300seg [W]

Rsa_{t-300} - Radiação acumulada até instante t-300seg [W]

A Potência útil foi obtida através da seguinte equação

$$2) PU_t = \frac{m_{\text{água}} \cdot C_p \cdot (T_{t+300} - T_{t-300})}{600} [W]$$

Onde:

PS_t - Potencia útil no instante t [W], obtida sem mudança de fase

T_{t+300} - Temperatura da água no instante t+300 [°C]

T_{t-300} - Temperatura da água no instante t-300 [°C]

$m_{\text{água}}$ - Massa da água [kg]

C_p - Calor específico a pressão constante da água [J/kg.K]

A eficiência foi calculada pela razão da Potência Útil e Potência Solar.

Caso de Estudo

$$3) \textit{Eficiência} = \frac{PU_t}{PS_t} \cdot 100 [\%]$$

29 de setembro

No dia 29 de setembro conseguiram atingir-se temperaturas elevadas relativamente rápido, uma vez que, as condições climáticas foram favoráveis. É possível ser conferido pelo traçado a preto na imagem que se segue, pois ilustra a irradiação solar captada, O facto de não haver oscilações de grande expressão, deve-se ao facto de o dia não apresentar qualquer neblina. Assim a radiação não foi filtrada pelas nuvens e por conseguinte conseguiu-se captar a máxima energia possível, obtendo assim um valor de temperatura ambiente no forno de 110°C às 13:15, com o um tacho que continha 2 l de água, ou seja, 250 min. após o início do ensaio.

Para este ensaio foi isolado o vidro frontal a partir das 13 h, isto permite testar a utilidade do vidro frontal, sendo assim, a radiação captada passa a ser realizada pelo vidro superior.

Com o gráfico abaixo notamos que houve uma quebra abrupta de temperatura no interior do forno, isto por ter sido necessário retirar o tacho com a água, por existir condensação no interior no forno.

De realçar que após fecharmos o forno, a velocidade de recuperação de temperaturas foi interessante. Isto comprova a elevada eficiência do forno na sua generalidade.

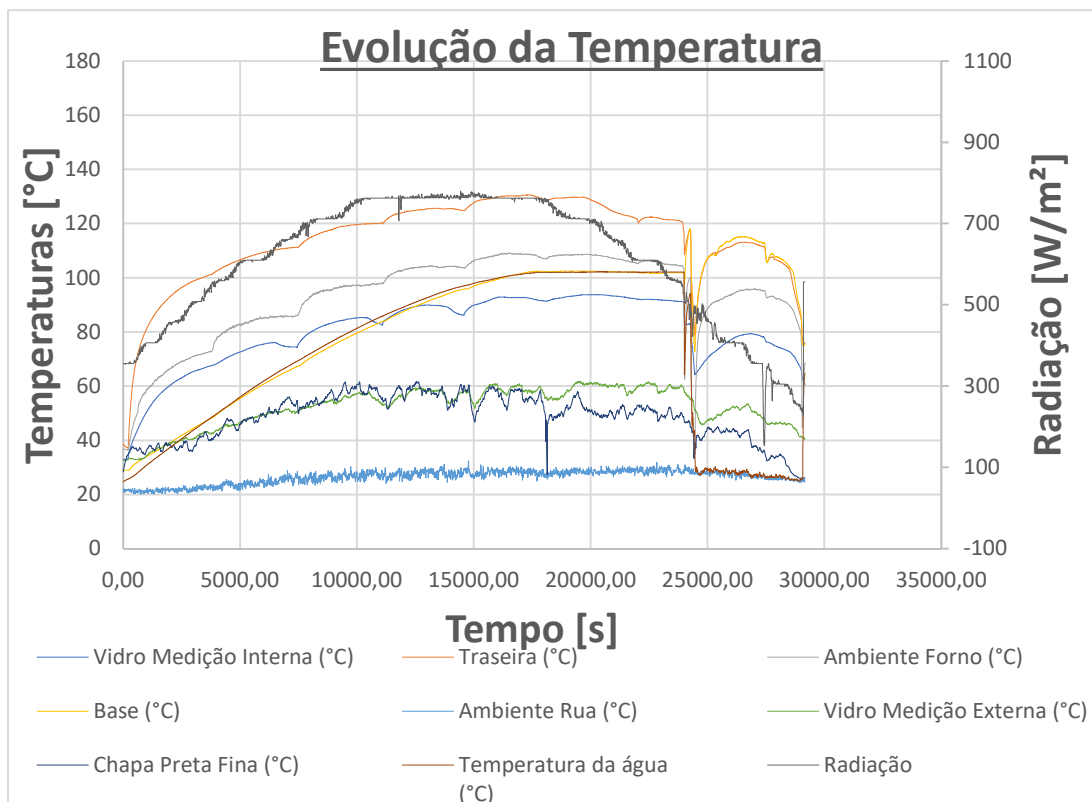


Gráfico 2 - Evolução das temperaturas e da radiação no dia 29 de setembro

4.2.4. Viabilidade de um Forno solar

No dia 14 de outubro, após vários dias de ensaios, conseguiu-se chegar à razão ideal de água e alimentos.

Como se pode ver no gráfico 4, são mostradas imagens relativas ao estado do tempo, que também se pode analisar no gráfico 3, onde existiram bastantes quebras de radiação ao longo dia. A figura mostra ainda registos fotográficos da confeção de alimentos realizada nesse dia.

Neste caso foi feita a confeção de arroz seco colocado desde o início do ensaio, às 9 h da manhã, retirando-se por volta das 12 h da tarde, A avaliação do estado do arroz foi realizada entre a comunidade estudantil e chegou-se à conclusão de que o arroz estava solto e perfeitamente cozido.

De seguida, foi realizado no mesmo ensaio, a confeção de um bolo de chocolate, introduzido no forno às 14 h e retirado 3 h depois, o bolo foi igualmente avaliado e chegou-se à conclusão que se encontraria apto para ser introduzido na ementa de uma família.

Caso de Estudo

No mesmo gráfico é possível visualizar a evolução das temperaturas ao longo do dia.

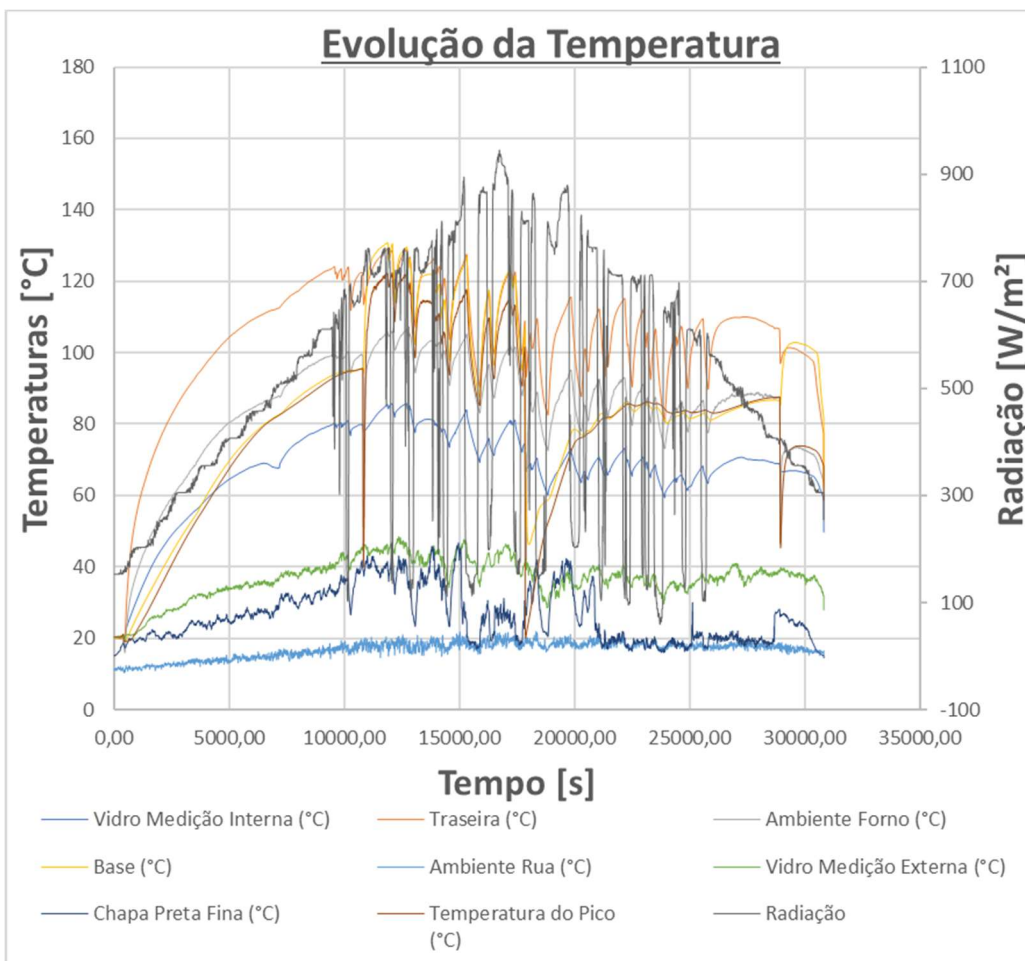


Gráfico 3: Evolução das temperaturas e da radiação no dia 14 de outubro de 2020

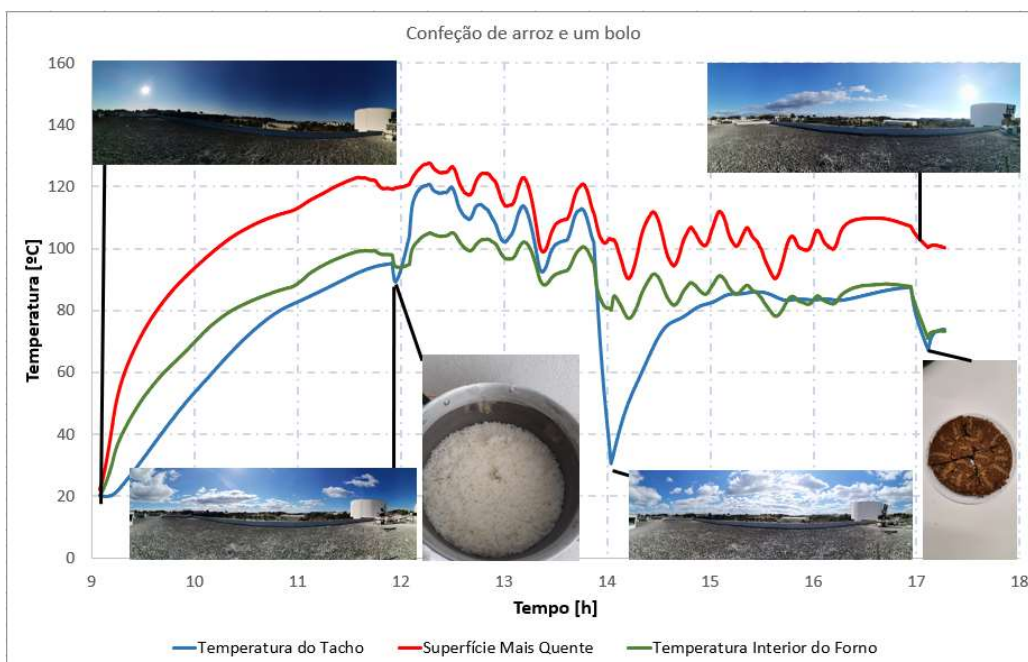


Gráfico 4: Análise da viabilidade do forno no dia 14 de outubro de 2020

Caso de Estudo

4.2.5. Materiais utilizados

Os materiais utilizados ao longo do estudo encontram-se listados a seguir:

Tabela 3: Tabela com materiais utilizados no caso de estudo

Materiais	Quantidade
Piranómetro	1
Placa de Aquisição Pico Technology	2
Panela	1
Bases de Aço	2 (5kg cada)
Forno solar	1
Arroz	1kg
Água	2l
Computador	3
Termopares	16
Fixadores do forno	3
Balança	1

Na figura 30 apresentamos um registo fotográfico do forno testado no caso de estudo.



Figura 30: Forno solar utilizado no caso de estudo.

Caso de Estudo

4.2.6. Resultados Obtidos

Na primeira fase de testes foram feitos ensaios nas duas primeiras semanas. Foi notório uma vantagem interessante em facilmente atingir valores acima dos 100°C nas faces internas do forno solar. Contudo, é possível observar através do gráfico 2 que a curva da radiação é parabólica, no entanto, as curvas de temperaturas não se revelavam paralelas ao gráfico da radiação, pois apresentavam um patamar de estagnação. Após análise foi decidido intervencionar o forno no que diz respeito ao isolamento e, no seguinte dia, os resultados foram superados a larga escala tendo atingido o valor máximo de temperaturas perto dos 150°C. O seu perfil de temperaturas já se assemelhou a um perfil parabólico, como o previsto.

No decurso deste estudo encontraram-se algumas dificuldades, como por exemplo, algum acréscimo de humidade quando o forno estava exposto ao exterior, o acerto do rácio água/alimentos, uma das preocupações sempre presente foi evitar o acumular de humidades também no que toca à evaporação, pois esta influenciaria diretamente os resultados, tendo em conta que é acumulada no forno internamente e com isso poderia formar-se junto ao vidro um filme de partículas de água, o que impede que a transmissão da radiação seja a mais eficaz.

Relativamente aos objetivos foram cumpridos com sucesso, sendo que os resultados obtidos ficaram acima dos esperados com a obtenção 6 h acima dos 80°C. Foi possível observar que, em caso de quebras de radiação, o forno conseguiu corresponder com prontidão a recuperar as temperaturas, sendo uma vantagem deste tipo de forno e também sinal de um bom isolamento.

No que à confeção diz respeito, foi possível confeccionar vários tipos de alimentos, no mesmo ensaio concretamente, confeccionaram-se duas refeições, num mesmo dia que, conforme foi possível observar, não apresentava as melhores condições atmosféricas. Nesse ensaio estabeleceu-se a razão ótima de confeção de arroz, correspondente a 1 chávena de arroz para 2 de água, sendo que posteriormente a isso foi confeccionado um bolo de chocolate (ambos comestíveis).

5. Análise crítica dos resultados

Com a realização da revisão da literatura depreende-se que a tipificação dos vários tipos de fornos, facilita a seleção daquele mais conveniente ao utilizador.

É possível ser observado, através dos índices de desempenho, as valências que cada tipo de forno oferece e em função disso identificar a quem é destinado. '

Assim sendo, a título de exemplo, verificamos que fornos do tipo direto são mais vantajosos do ponto de vista económico. No entanto, para pessoas com poucos recursos, económicos e literários e poucos recursos materiais, são opções que não necessitam de formação, elevados custos e tecnicamente conseguem garantir um bom desempenho.

Comparativamente com os fornos solares do tipo indireto, estes possuem mais tecnologias de armazenamento de energia, são fornos que utilizam materiais mais dispendiosos e que não são acessíveis a todos os utilizadores, nomeadamente, o forno solar indireto com armazenamento de energia latente, onde se utiliza acetamida.

Uma vez que o forno solar direto caixa com refletor é o equipamento mais comum e mais testados, realizou-se o caso de estudo.

Observou-se que, tecnicamente, foram obtidos ótimos resultados comparando estudos do mesmo tipo de fornos.

Realizando uma análise à viabilidade do forno, verificamos que num dia em que a irradiação solar foi várias vezes filtrada pelas nuvens e ainda assim conseguiu-se 6 h de temperaturas acima dos 80°C, sendo essa uma temperatura passível para realização de refeições.

Análise de resultados

6. Conclusão

O equipamento forno solar surge como forma de aproveitamento da irradiação solar captada pela Terra.

Um dos objetivos desta dissertação é dar a conhecer várias formas e conceitos para a construção de um forno solar. Para depois numa segunda fase identificar um forno acessível a todas as famílias, realizando inúmeros ensaios com vista a validar a sua viabilidade.

É então realizada uma divisão de fornos solares por dois tipos principais, o tipo direto e indireto. Sendo a principal diferença a forma como é utilizada a radiação obtida pelo sol, no tipo direto a radiação é focada diretamente para o interior do forno solar, onde são utilizados na sua maioria fornos solares com refletores. No tipo indireto os fornos solares utilizam a radiação para aquecer meios que permitem armazenar energia para de seguida aquecer o forno solar.

Apresentados todos os tipos de fornos é possível tirar conclusões de forma que seja possível a projeção de fornos solares para todas as necessidades, pois existem fornos que são constituídos por cartão e uma folha de alumínio e também fornos que usam materiais mais dispendiosos.

Dadas todas as possibilidades para a construção de um forno solar é importante identificar quais as prioridades que cada utilizador irá privilegiar para a sua utilização.

Na realização do caso de estudo verificou-se que o comportamento técnico do forno solar tipo caixa com refletor apresentou bons resultados, atingindo uma temperatura 110°C no interior do forno. Dar nota ainda, que foi possível obter 6h de temperaturas

Conclusão

acima dos 80°C, num ensaio onde foram confeccionadas 2 receitas e com condições de irradiação solar inconstante.

Conclui-se desta forma que, a aposta em fornos solares poderá ter um impacto positivo para as famílias, quer monetariamente, quer no bem-estar das mesmas. Para trabalhos e investigações futuras, podem ser ainda exploradas, a capacidade de armazenamento de energia com utilização de materiais acessíveis, utilização super isolantes e formas de seguimento automático do sol. A relevância destes fatores deverá ser estudada de modo a permitir o aumento das eficiências térmicas bem como o acesso facilitado aos fornos solares.

7. Referências bibliográficas

Agency, M.-D. I. (2023). *Generg | Area Educativa | Solar*. GENERG.

<https://www.generg.pt/pt/area-educativa/area-educativa-solar/>

Aggarwal, S. K., & Saini, L. M. (2014). Solar energy prediction using linear and non-linear regularization models: A study on AMS (American Meteorological Society) 2013–14 Solar Energy Prediction Contest. *Energy*, 78, 247–256.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.012>

Ahmed, S. M. M., Al-Amin, Md. R., Ahammed, S., Ahmed, F., Saleque, A. M., & Abdur Rahman, Md. (2020). Design, construction and testing of parabolic solar cooker for rural households and refugee camp. *Solar Energy*, 205, 230–240.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.007>

Bailek, N., Bouchouicha, K., Al-Mostafa, Z., El-Shimy, M., Aoun, N., Slimani, A., & Al-Shehri, S. (2018). A new empirical model for forecasting the diffuse solar radiation over Sahara in the Algerian Big South. *Renewable Energy*, 117, 530–537.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.081>

Bala, B. K. (1998). Solar drying systems: Simulations and optimization. *Solar Drying Systems: Simulations and Optimization*.

<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19992400428>

Referencias Bibliográficas

- Barba, F. J., Gavahian, M., Es, I., Zhu, Z., Chemat, F., Lorenzo, J. M., & Mousavi Khaneghah, A. (2019). Solar radiation as a prospective energy source for green and economic processes in the food industry: From waste biomass valorization to dehydration, cooking, and baking. *Journal of Cleaner Production*, *220*, 1121–1130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.175>
- Besharat, F., Dehghan, A. A., & Faghieh, A. R. (2013). Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *21*, 798–821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.043>
- Bombelli, A., Di Paola, A., Chiriaco, M. V., Perugini, L., Castaldi, S., & Valentini, R. (2019). Solar Energy Engineering. Em R. Valentini, J. L. Sievenpiper, M. Antonelli, & K. Dembska (Eds.), *Achieving the Sustainable Development Goals Through Sustainable Food Systems* (pp. 25–34). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23969-5_2
- Boriskina, S. V., Tong, J. K., Hsu, W.-C., Weinstein, L., Huang, X., Loomis, J., Xu, Y., & Chen, G. (2015). Hybrid optical-thermal devices and materials for light manipulation and radiative cooling. *Active Photonic Materials VII*, *9546*, 190–196. <https://doi.org/10.1117/12.2189679>
- Çengel, Y., & Ghajar, A. (2012). *Transferência de Calor e Massa* (4ª). AMGH Editora Ltda.
https://www.academia.edu/26611277/Transfer%C3%Aancia_de_Calor_e_Massa_%C3%87engel_4a_edi%C3%A7%C3%A3o_
- Chakma, B., Serto, L., Kharpude, S., Narale, P., & Seveda, M. S. (2021). Life cycle assessment analysis, embodied energy evaluation and economic aspect study of double mirror reflector box type solar cooker for NEH region of Sikkim.

Referencias Bibliográficas

- International Journal of Green Energy*, 1–18.
<https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1978446>
- Chen, C., Li, Y., Song, J., Yang, Z., Kuang, Y., Hitz, E., Jia, C., Gong, A., Jiang, F., Zhu, J. Y., Yang, B., Xie, J., & Hu, L. (2017). Highly Flexible and Efficient Solar Steam Generation Device. *Advanced Materials*, 29(30), 1701756.
<https://doi.org/10.1002/adma.201701756>
- Cogliani, E., Ricchiazzi, P., & Maccari, A. (2007). Physical model Solarmet for determining total and direct solar radiation by meteosat satellite images. *Solar Energy*, 81(6), 791–798. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.09.012>
- Cuce, P. M. (2018). Box type solar cookers with sensible thermal energy storage medium: A comparative experimental investigation and thermodynamic analysis. *Solar Energy*, 166, 432–440. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.077>
- Das, S., Solomon, S. S., & Saini, A. (2019). Thermal analysis of paraboloid dish type solar cooker. *Journal of Physics: Conference Series*, 1276(1), 012055.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1276/1/012055>
- Dong, J., Olama, M. M., Kuruganti, T., Melin, A. M., Djouadi, S. M., Zhang, Y., & Xue, Y. (2020). Novel stochastic methods to predict short-term solar radiation and photovoltaic power. *Renewable Energy*, 145, 333–346.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.073>
- El Moussaoui, N., Talbi, S., Atmane, I., Kassmi, K., Schwarzer, K., Chayeb, H., & Bachiri, N. (2020). Feasibility of a new design of a Parabolic Trough Solar Thermal Cooker (PSTC). *Solar Energy*, 201, 866–871.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.079>

Referencias Bibliográficas

- Fang, S., Chu, W., Tan, J., & Guo, W. (2022). The mechanism for solar irradiation enhanced evaporation and electricity generation. *Nano Energy*, *101*, 107605. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107605>
- Fath, H. E. S., Elsherbiny, S. M., Hassan, A. A., Rommel, M., Wiegand, M., Koschikowski, J., & Vatansever, M. (2008). PV and thermally driven small-scale, stand-alone solar desalination systems with very low maintenance needs. *Desalination*, *225*(1), 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.11.029>
- Faustino Neto, C. A., & Guerra, F. K. de O. M. V. (2020). Fogão solar do tipo painel com materiais de baixo custo: Uma alternativa para cocção de alimentos. *Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica*, *2*(1), 22–30. <https://doi.org/10.21708/issn27635325.v2n1.a9648.2020>
- Ferreira, L. C., Amarante, M. dos S., Cintra, A. B. de G., Lourenço, R. A., & Cristiano, C. (2018). Energia solar fotovoltaica. *Revista Pesquisa e Ação*, *4*(1), Artigo 1.
- Gao, Y., Miyata, S., & Akashi, Y. (2022). Multi-step solar irradiation prediction based on weather forecast and generative deep learning model. *Renewable Energy*, *188*, 637–650. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.051>
- Geddam, S., Dinesh, G. K., & Sivasankar, T. (2015). Determination of thermal performance of a box type solar cooker. *Solar Energy*, *113*, 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.014>
- Gomes, M. (2004). *Construção e avaliação de desempenho de fornos solares*. Ciência Viva. <https://webstorage.cienciaviva.pt/public/pt.cienciaviva.www/rede/pdf/guia7.pdf>

Referencias Bibliográficas

- Gorjian, A., Rahmati, E., Gorjian, S., Anand, A., & Jathar, L. D. (2022). A comprehensive study of research and development in concentrating solar cookers (CSCs): Design considerations, recent advancements, and economics. *Solar Energy*, *245*, 80–107. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.066>
- Guermoui, M., Melgani, F., Gairaa, K., & Mekhalfi, M. L. (2020). A comprehensive review of hybrid models for solar radiation forecasting. *Journal of Cleaner Production*, *258*, 120357. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120357>
- Halacy, B., & Halacy, D. S. (1992). *Cooking with the Sun*. Morning Sun Press.
- Harmim, A., Belhamel, M., Boukar, M., & Amar, M. (2010). Experimental investigation of a box-type solar cooker with a finned absorber plate. *Energy*, *35*(9), 3799–3802. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.032>
- Harmim, A., Merzouk, M., Boukar, M., & Amar, M. (2013). Design and experimental testing of an innovative building-integrated box type solar cooker. *Solar Energy*, *98*, 422–433. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.09.019>
- Harmim, A., Merzouk, M., Boukar, M., & Amar, M. (2014). Solar cooking development in Algerian Sahara: Towards a socially suitable solar cooker. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *37*, 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.028>
- Herez, A., Ramadan, M., & Khaled, M. (2018). Review on solar cooker systems: Economic and environmental study for different Lebanese scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 421–432. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.021>

Referencias Bibliográficas

- H.M.S, hussein, H.H., E.-G., & S.A., N. (2008). Experimental investigation of novel indirect solar cooker with indoor PCM thermal storage and cooking unit— ScienceDirect. *Energy Conversion and Management*, 49(8), 2237–2246. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.01.026>
- Horace De Saussure and his hot boxes of the 1700's.* (2002). <http://solarcooking.org/saussure.htm>
- Huang, Z., Yuan, X., & Liu, X. (2021). The key drivers for the changes in global water scarcity: Water withdrawal versus water availability. *Journal of Hydrology*, 601, 126658. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126658>
- Hum, V. (2018, agosto). Atmospheric Effects. www.waves.utoronto.ca. <https://www.waves.utoronto.ca/prof/svhum/ece422/notes/20a-atmospheric-refr.pdf>
- Iqbal, M. (1983). An Introduction to Solar Radiation. Em M. Iqbal (Ed.), *An Introduction to Solar Radiation* (pp. 43–58). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373750-2.50008-2>
- Janjai, S., & Bala, B. K. (2012). Solar Drying Technology. *Food Engineering Reviews*, 4(1), 16–54. <https://doi.org/10.1007/s12393-011-9044-6>
- Janjai, S., Laksanaboonsong, J., Nunez, M., & Thongsathitya, A. (2005). Development of a method for generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical environment. *Solar Energy*, 78(6), 739–751. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.009>

Referencias Bibliográficas

- Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., & Mahmoud, G. M. (2021). Performance evaluation of continuous solar still water desalination system. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 144(3), 907–916. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09547-5>
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A. A., & Kim, K.-H. (2018). Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 894–900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231–295. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2004.02.001>
- Kalogirou, S. A. (2013). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press.
- Khatri, R., Goyal, R., & Sharma, R. K. (2021). Advances in the developments of solar cooker for sustainable development: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111166. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111166>
- Knudson, B. (2003). State of the art of Solar Cooking early uses of the sun to serve humanity. *www.she-inc.org.*, 244.
- Kumar, A., Saxena, A., Pandey, S. D., & Joshi, S. K. (2022). Design and performance characteristics of a solar box cooker with phase change material: A feasibility study for Uttarakhand region, India. *Applied Thermal Engineering*, 208(118196). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118196>

Referencias Bibliográficas

- Lam, J. C., Wan, K. K. W., & Yang, L. (2008). Solar radiation modelling using ANNs for different climates in China. *Energy Conversion and Management*, 49(5), 1080–1090. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.09.021>
- Lentswe, K., Mawire, A., Owusu, P., & Shobo, A. (2021). A review of parabolic solar cookers with thermal energy storage. *Heliyon*, 7(10), e08226. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08226>
- Liao, X., Zhu, R., & Wong, M. S. (2022). Simplified estimation modeling of land surface solar irradiation: A comparative study in Australia and China. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102323. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102323>
- Makade, R. G., Chakrabarti, S., & Jamil, B. (2019). Prediction of global solar radiation using a single empirical model for diversified locations across India. *Urban Climate*, 29, 100492. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100492>
- Maria Telkes. (1959). Solar cooking ovens. *Solar Energy*, 3(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(59\)90053-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(59)90053-2)
- Mollahosseini, A., Abdelrasoul, A., Sheibany, S., Amini, M., & Salestan, S. K. (2019). Renewable energy-driven desalination opportunities – A case study. *Journal of Environmental Management*, 239, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.044>
- Morrison, G. L., Budihardjo, I., & Behnia, M. (2004). Water-in-glass evacuated tube solar water heaters. *Solar Energy*, 76(1), 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.024>

Referencias Bibliográficas

- Nahar, N. M. (2003). Performance and testing of a hot box storage solar cooker. *Energy Conversion and Management*, 44(8), 1323–1331. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00113-9)
- Panchal, H., Patel, J., & Chaudhary, S. (2019). A comprehensive review of solar cooker with sensible and latent heat storage materials. *International Journal of Ambient Energy*, 40(3), 329–334. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1392357>
- Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2012). State of the art of solar cooking: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3776–3785. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.026>
- Reboita, M. S., Pimenta, A. de P., & Natividade, U. A. (2015). Influência da inclinação do eixo de rotação da Terra na temperatura do ar global. *Terrae Didactica*, 11(2), Artigo 2. <https://doi.org/10.20396/td.v11i2.8640680>
- Regattieri, A., Piana, F., Bortolini, M., Gamberi, M., & Ferrari, E. (2016). Innovative portable solar cooker using the packaging waste of humanitarian supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.199>
- Sabiha, M. A., Saidur, R., Mekhilef, S., & Mahian, O. (2015). Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1038–1054. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.016>
- Santos, A. C. G. G. dos, & Machado, V. de M. (2021). Atividades de investigação no ensino de astronomia: Sequência didática sobre os movimentos e inclinação do eixo da terra nos anos iniciais do ensino fundamental. *VIDYA*, 41(2), Artigo 2. <https://doi.org/10.37781/vidya.v41i2.3852>

Referências Bibliográficas

- Santos, F. H., Bühler, A. J., Filho, N. B., & Zambra, D. A. B. (2015). A importância da determinação do espectro da radiação local para um correto dimensionamento das tecnologias de conversão. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 19, 11.43-11.54.
- Sharma, S. D., Buddhi, D., Sawhney, R. L., & Sharma, A. (2000). Design, development and performance evaluation of a latent heat storage unit for evening cooking in a solar cooker. *Energy Conversion and Management*, 41(14), 1497–1508. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00193-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00193-4)
- Sharma, S. D., Iwata, T., Kitano, H., & Sagara, K. (2005). Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit. *Solar Energy*, 78(3), 416–426. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.001>
- Sharon, H., Vivar, M., & Fuentes, M. (2022). A review on role of solar photovoltaic (PV) modules in enhancing sustainable water production capacity of solar distillation units. *Journal of Environmental Management*, 320, 115781. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115781>
- Silva, F. S. da, Catelli, F., & Giovannini, O. (2010). Um modelo para o movimento anual do sol a partir de uma perspectiva geocêntrica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 27(1), 7–25.
- Solar Cooker at Cantina West. (2017). *Solar Cooking History*. History of Solar Cooking. <https://www.solarcooker-at-cantinawest.com/solarcooking-history.html>
- Solar Cookers Internacional. (2019, julho 14). *History of solar cooking*. Solar Cooking. https://solarcooking.fandom.com/wiki/History_of_solar_cooking

Referencias Bibliográficas

- Solomon, A. (2014). *Evaluation of Thermal Energy Storage Materials for Solar Cooker* [Dissertação de mestrado, Helsinki Metropolia University of Applied Sciences].
<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/84229/Evaluation%20of%20thermal%20energy%20storage%20materials%20for%20solar%20cooker.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tao, P., Ni, G., Song, C., Shang, W., Wu, J., Zhu, J., Chen, G., & Deng, T. (2018). Solar-driven interfacial evaporation. *Nature Energy*, 3(12), Artigo 12.
<https://doi.org/10.1038/s41560-018-0260-7>
- Tavares, A. C. M. (2018). *Estudo de novos procedimentos para ensaio de fornos solares do tipo caixa para confeção dos alimentos* [Dissertação de mestrado, Universidade de Évora- Escola de Ciências e Tecnologia].
<http://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/23920>
- Tavares, A., Cavaco, A., Collares-Pereira, M., & Oliveira, N. (2018). The Suntaste, a new cork based solar box cooker. *International Conference on Advances in Solar Thermal Food Processing*, 7002–7554.
- The World Bank, *Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data: Solargis*. (2020).
<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>
- Torres, P. (2021). *Radiação Solar: O que é, tipos e como chega à Terra*. Cola da Web.
<https://www.coladaweb.com/fisica/ondas/radiacao-solar>
- Tymvios, F. S., Jacovides, C. P., Michaelides, S. C., & Scouteli, C. (2005). Comparative study of Ångström's and artificial neural networks' methodologies in estimating global solar radiation. *Solar Energy*, 78(6), 752–762.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.007>

Referencias Bibliográficas

- Voyant, C., Notton, G., Kalogirou, S., Nivet, M.-L., Paoli, C., Motte, F., & Fouilloy, A. (2017). Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review. *Renewable Energy*, *105*, 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.095>
- Wentzel, M., & Pouris, A. (2007). The development impact of solar cookers: A review of solar cooking impact research in South Africa. *Energy Policy*, *35*(3), 1909–1919. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.06.002>
- Wu, X., Wu, Z., Wang, Y., Gao, T., Li, Q., & Xu, H. (2021). All-Cold Evaporation under One Sun with Zero Energy Loss by Using a Heatsink Inspired Solar Evaporator. *Advanced Science*, *8*(7), 2002501. <https://doi.org/10.1002/advs.202002501>
- Yeom, J.-M., Seo, Y.-K., Kim, D.-S., & Han, K.-S. (2016). Solar Radiation Received by Slopes Using COMS Imagery, a Physically Based Radiation Model, and GLOBE. *Journal of Sensors*, *2016*, e4834579. <https://doi.org/10.1155/2016/4834579>
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, *23*(3), 251–283. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
- Zhang, X., Liang, S., Zhou, G., Wu, H., & Zhao, X. (2014). Generating Global Land Surface Satellite incident shortwave radiation and photosynthetically active radiation products from multiple satellite data. *Remote Sensing of Environment*, *152*, 318–332. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.003>
- Zhao, F., Zhou, X., Shi, Y., Qian, X., Alexander, M., Zhao, X., Mendez, S., Yang, R., Qu, L., & Yu, G. (2018). Highly efficient solar vapour generation via hierarchically nanostructured gels. *Nature Nanotechnology*, *13*(6), Artículo 6. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0097-z>

Referencias Bibliográficas

- Zhou, J., Gu, Y., Liu, P., Wang, P., Miao, L., Liu, J., Wei, A., Mu, X., Li, J., & Zhu, J. (2019). Development and Evolution of the System Structure for Highly Efficient Solar Steam Generation from Zero to Three Dimensions. *Advanced Functional Materials*, 29(50), 1903255. <https://doi.org/10.1002/adfm.201903255>
- Zhou, Y., Liu, Y., Wang, D., Liu, X., & Wang, Y. (2021). A review on global solar radiation prediction with machine learning models in a comprehensive perspective. *Energy Conversion and Management*, 235, 113960. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113960>
- Zhu, R., Wong, M. S., You, L., Santi, P., Nichol, J., Ho, H. C., Lin, L., & Ratti, C. (2020). The effect of urban morphology on the solar capacity of three-dimensional cities. *Renewable Energy*, 153, 1111–1126. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.050>

Referencias Bibliográficas

8. Anexos