



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ESTUDO DE NOVOS PROCEDIMENTOS PARA ENSAIOS DE FORNOS SOLARES DO TIPO CAIXA PARA CONFEÇÃO DOS ALIMENTOS

Ailton César Moniz Tavares

Orientação | Doutor Manuel Pedro Ivens Collares Pereira

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, 2018



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ESTUDO DE NOVOS PROCEDIMENTOS PARA ENSAIOS DE FORNOS SOLARES DO TIPO CAIXA PARA CONFEÇÃO DOS ALIMENTOS

Ailton César Moniz Tavares

Orientação | Doutor Manuel Pedro Ivens Collares Pereira

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, 2018

Resumo

Os fornos solares do tipo caixa têm sido ensaiados de acordo com procedimentos [1, 2], propostos para constituírem uma norma de ensaios. Estes procedimentos baseiam-se em definições e medidas com características que não cumprem cabalmente o objetivo. Nesta dissertação propõe novos coeficientes para avaliar a performance dos fornos solares de tipo caixa, que têm em conta, de uma forma completa, as distintas características físicas dos mesmos, considerando a inclinação do vidro da cobertura, as variações das suas áreas de captação da radiação solar com a variação sazonal do sol. Em particular procura eliminar a dependência dos ensaios com a altura do ano em que são realizados (sazonalidade). Os resultados obtidos permitiram ainda propor um novo coeficiente (o tempo até à ebulição) verdadeiramente útil para a comparação direta entre fornos. Com estes resultados conclui-se que os novos coeficientes possuem características para poderem integrar uma proposta de uma futura norma de ensaios.

Palavras-chave: Fornos Solares, procedimentos de ensaio, norma, coeficientes de mérito, performance térmica.

Abstract

Study of new procedures for the testing of box-type solar cookers for food confectionery

Box-type solar cookers have been tested according to procedures [1, 2] proposed to constitute a test standard. These procedures are based on definitions and measurements with characteristics that don't meet their objective. In this dissertation we propose new figures of merit to evaluate the performance of a box-type solar cooker, which take into account different physical characteristics of the solar cookers, considering inclination of the cover glass and the variations of its area to incoming beam radiation with the seasonal variation of the sun's height. In particular, it seeks to eliminate the dependence with time of the year tests are carried out (seasonality). The results obtained allowed for a new coefficient (time to boiling) to be proposed, which is truly useful for the direct comparison between solar cookers. With these results we conclude that the new coefficients have the right characteristics to integrate a proposal for a future test standard.

Keywords: Solar Cookers, test procedure, standard, figures of merit, thermal performance.

Agradecimentos

Durante a realização desta dissertação contei com a ajuda e colaboração de muitas pessoas e instituições, as quais quero endereçar os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Manuel Collares Pereira, pela ajuda constante, pelos ensinamentos e pela profícua orientação.

Agradeço a Fundação Millennium Bcp que me proporcionou condições financeiras propícias para atingir este êxito.

Agradeço a Cátedra Energias Renováveis da Universidade de Évora e ao Instituto Português de Energia Solar (IPES) que me disponibilizaram dados da radiação, espaço, equipamentos e condições favoráveis para a realização dos ensaios. Aproveito também para agradecer a SUN OK e o Engenheiro Nuno Oliveira Martins por ter disponibilizado os fornos solares para os testes.

Um agradecimento especial à Marina Ferreira pelo apoio incondicional.

E, por fim, agradeço a todos os meus familiares e colegas que sempre me apoiaram.

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
Nomenclatura.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Estado da Arte.....	2
1.2.1. Forno Solar de tipo caixa.....	2
1.2.2. Normalização.....	3
1.3. Organização da dissertação.....	4
2. Fundamentação Teórica	7
2.1. Forno Solar de tipo caixa	7
2.2. Forno solar de tipo painel	8
2.3. Forno solar de tipo concentrador	9
2.4. Configuração, ótica e dimensões dos fornos estudados na dissertação	10
2.4.1. SUNCOOK.....	10
2.4.2. SUNTASTE.....	13
3. Coeficientes de mérito e “performance” térmica do forno tipo caixa.....	15
3.1. Definições convencionais	15
3.2. A proposta de definição: novos coeficientes de mérito	18

4. Ensaio Experimentais: Tipo e procedimentos.....	27
4.1. Ensaio de temperatura de estagnação da placa	30
4.2. Ensaio de temperatura de estagnação da placa com o refletor tapado	30
4.3. Ensaio com água	31
4.4. Ensaio com a água e com o refletor do forno tapado.....	32
5. Resultados: Aplicação à fornos comerciais.....	33
5.1. Ensaio do SUNCOOK	33
5.1.1. Ensaio de temperatura de estagnação da placa.....	33
5.1.2. Ensaio de temperatura de estagnação da placa com o refletor tapado.....	34
5.1.3. Ensaio com a água – Comportamento térmico do forno	35
5.2. Ensaio dos fornos SUNTASTE	39
5.2.1. Ensaio de temperatura de estagnação da placa.....	39
5.2.2. Ensaio com a água – Comportamento térmico do forno	40
5.3. Estudo da sazonalidade dos coeficientes medidos e resultados obtidos.....	43
5.3.1. Ensaio de estagnação da placa.....	43
5.3.2. Ensaio com a água – Comportamento térmico do forno	44
6. Caracterização dos fornos pela potência	51
7. Conclusões.....	59
8. Referências.....	63
9. Anexos	67

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Forno solar de tipo caixa com vidro plano (a) simples; (b) com o espelho refletor [20].....	7
Figura 2.2 – Forno solar de tipo caixa (a) – com dois refletores; (b) – três refletores; (c) – quatro refletores [21].	8
Figura 2.3 - Forno solar de tipo caixa com o vidro inclinado (a) - com refletor simples [14]; (b) - com oito refletores [12].....	8
Figura 2.4 - Forno solar de tipo painel [Adaptado de 21].	9
Figura 2.5 - Forno solar de concentração (a)- Parabolóide; (b)- Fresnel; (c)- Cilindro-parabólico.	9
Figura 2.6 - O SUNCOOK: (a)- Caixa fechada; (b) – tampa aberta com o refletor e o <i>booster</i>	11
Figura 2.7 – Seções transversais do SUNCOOK (a) Frente e trás; (b) esquerda e direita – mostrando os CPCs assimétricos.	12
Figura 2.8 - Vistas de frente e de trás do SUNTASTE (COMPACT e LARGE).	13
Figura 2.9 – <i>Cross section</i> do SUNTASTE no plano transversal.	14
Figura 3.1 - Forno solar de tipo caixa, com vidro da cobertura plano testado no inverno.	20
Figura 3.2 - Forno solar de tipo caixa, com vidro da cobertura plano testado no verão.	21
Figura 3.3 - Forno solar de tipo caixa, com vidro da cobertura inclinado testado no inverno.	21
Figura 3.4 - Forno solar de tipo caixa, com vidro da cobertura plano testado no verão.	22
Figura 4.1 - Multímetro digital usado durante os testes.	28
Figura 4.2 - Aparato experimental.....	28
Figura 4.3 - Piranómetro <i>Kipp and Zonen</i> -CMP11 e os seus componentes.....	29
Figura 4.4 – Ensaio de estagnação da placa de absorção do forno.....	30
Figura 4.5 - Ensaio de estagnação da placa de absorção do forno, com os espelhos refletores dos fornos tapados.	31
Figura 4.6 – Ensaio com a água.....	32
Figura 4.7 – Ensaio com a água e com os refletores dos fornos tapados.	32
Figura 5.1 - Evolução da temperatura da água com o tempo (da temperatura ambiente até a ebulição, 20/11/2017) nos SUNCOOK's.	38

Figura 5.2 - Evolução da temperatura da água com o tempo (da temperatura ambiente até à ebulição, 20/11/2017) nos SUNTASTE's.	42
Figura 5.3 - Evolução da temperatura da água com o tempo (da temperatura ambiente até à ebulição, 20/11/2017) nos quatro fornos.	48
Figura 5.4 - Evolução da temperatura da água com o tempo (da temperatura ambiente até à ebulição, 13/07/2018) nos quatro fornos.	48
Figura 6.1 - Potência de cozedura do SUNCOOK.	53
Figura 6.2 - Potência de cozedura padronizada do SUNCOOK.	53
Figura 6.3 - Potência de cozedura do SUNCOOK com o boost.	54
Figura 6.4 - Potência de cozedura padronizada do SUNCOOK com o boost.	55
Figura 6.5 - Potência de cozedura do SUNTASTE COMPACT.	56
Figura 6.6 - Potência de cozedura padronizada do SUNTASTE COMPACT.	56
Figura 6.7 - Potência de cozedura do SUNTASTE LARGE.	57
Figura 6.8 - Potência de cozedura padronizada do SUNTASTE LARGE.	58
Figura 9.1 - Evolução da temperatura da placa dos SUNCOOK's com o tempo (25-09-2017).	69
Figura 9.2 - Evolução da temperatura da placa dos SUNCOOK's com o tempo (23-10-2017).	70
Figura 9.3 - Evolução da temperatura da placa dos SUNCOOK's com o tempo (15-11-2017).	70
Figura 9.4 - Evolução da temperatura da placa dos SUNCOOK's com o tempo, seguindo a norma indiana (02-10-2017).	71
Figura 9.5 - Evolução da temperatura da placa dos SUNCOOK's com o tempo, seguindo a norma indiana (03-10-2017).	71
Figura 9.6 - Evolução da temperatura da placa dos SUNCOOK's com o tempo, seguindo a norma indiana (06-10-2017).	72
Figura 9.7 - Evolução da temperatura da água dos SUNCOOK's ao longo do tempo (16-11-2017).	72
Figura 9.8 - Evolução da temperatura da água dos SUNCOOK's ao longo do tempo (17-11-2017).	73
Figura 9.9 - Evolução da temperatura da água dos SUNCOOK's ao longo do tempo (20-11-2017).	73

Figura 9.10 - Evolução da temperatura da placa dos SUNTASTE's com o tempo (25-09-2017).....	74
Figura 9.11 - Evolução da temperatura da placa dos SUNTASTE's com o tempo (23-10-2017).....	75
Figura 9.12 - Evolução da temperatura da placa dos SUNTASTE's com o tempo (15-11-2017).....	75
Figura 9.13 - Evolução da temperatura da água dos SUNTASTE's ao longo do tempo (16-11-2017).....	76
Figura 9.14 - Evolução da temperatura da água dos SUNTASTE's ao longo do tempo (17-11-2017).....	77
Figura 9.15 - Evolução da temperatura da água dos SUNTASTE's ao longo do tempo (20-11-2017).....	77
Figura 9.16 - Evolução da temperatura da placa, dos quatro fornos, com o tempo (09-07-2018).....	78
Figura 9.17 - Evolução da temperatura da placa, dos quatro fornos, com o tempo (25-07-2018).....	79
Figura 9.18 - Evolução da temperatura da água, dos quatro fornos, ao longo do tempo (11-07-2018).....	79
Figura 9.19 - Evolução da temperatura da água, dos quatro fornos, ao longo do tempo (13-07-2018).....	80

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Ângulos de aceitação dos CPCs do SUNCOOK, e os seus respetivos <i>stationarity time</i> previstos.	12
Tabela 2.2 - Dimensões relevantes do forno SUNCOOK.	12
Tabela 2.3 – Ângulos de aceitação dos CPCs do SUNTASTE (COMPACT e LARGE), e os seus respetivos <i>stationarity time</i> previstos.	14
Tabela 2.4 – Dimensões dos fornos SUNTASTE COMPACT e SUNTASTE LARGE.	14
Tabela 5.1 - Resumo dos ensaios de estagnação da placa de absorção dos SUNCOOK’s.	33
Tabela 5.2 - Coeficientes de mérito F_1 , relativamente aos ensaios de estagnação da placa.	34
Tabela 5.3 - Coeficientes de mérito F_{1new} , relativamente aos ensaios de estagnação da placa.	34
Tabela 5.4 - Resumo dos ensaios de temperatura de estagnação da placa dos SUNCOOK’s, de acordo com a norma indiana.	35
Tabela 5.5 - Massas de água utilizadas no SUNCOOK e no SUNCOOK com o boost. 36	
Tabela 5.6 - Área de captação da radiação solar incidente (A_n), dos SUNCOOK’s, para os dias indicados.	36
Tabela 5.7 - Tempos τ e τ_1 dos ensaios com a água, relativamente aos SUNCOOK’s, para os dias indicados.	36
Tabela 5.8 - Coeficiente F_{2new} , relativamente aos ensaios da água, com os SUNCOOK’s.	37
Tabela 5.9 - Temperaturas $\tau_{0medido}$ e τ_{0new} para o ensaio da água com os SUNCOOK’s. 38	
Tabela 5.10 - Resumo dos ensaios de temperatura de estagnação da placa dos SUNTASTE’s.	39
Tabela 5.11 - Coeficientes de mérito F_{1new} , relativamente aos ensaios de estagnação da placa dos SUNTASTE’s.	40
Tabela 5.12 - Área de captação da radiação solar incidente (A_n), dos SUNTASTE’s. ...	40
Tabela 5.13 - Massas de água utilizadas no SUNTASTE (COMPACT e LARGE).	41
Tabela 5.14 - Tempos τ e τ_1 medidos, utilizando os fornos SUNTASTE’s.	41
Tabela 5.15 - Coeficiente F_{2new} medidos, utilizando os fornos SUNTASTE’s.	41

Tabela 5.16 - Temperaturas $\tau_{0\text{medido}}$ e $\tau_{0\text{new}}$ para o ensaio da água com os SUNTASTE's.	42
Tabela 5.17 – Resumo dos ensaios de temperatura de estagnação da placa, com os 4 fornos.....	43
Tabela 5.18 – Coeficiente de mérito $F_{1\text{new}}$ dos quatro fornos ensaiados.	44
Tabela 5.19 - Área de captação da radiação solar incidente (A_n), dos quatro fornos.....	45
Tabela 5.20 - Massas de água utilizadas nos quatro fornos.....	45
Tabela 5.21 – Tempos τ e τ_1 , obtidos nos quatro fornos, no ensaio com a água.	46
Tabela 5.22 - Coeficiente $F_{2\text{new}}$, relativamente aos ensaios com a água, com os quatro fornos.....	46
Tabela 5.23 - Temperaturas $\tau_{0\text{medido}}$ e $\tau_{0\text{new}}$ para o ensaio da água com os quatro fornos.	49
Tabela 9.1 – Concentração: mensal e média anual do SUNTASTE (COMPACT e LARGE).	67
Tabela 9.2 - Especificações técnicas do piranómetro <i>Kipp and Zonen – CMP11</i> e a sua classificação segundo a norma ISO 9060:1990.....	68

Nomenclatura

a	intercetação da reta com o eixo vertical (W)
A_c	área da cobertura de vidro (m^2)
A_H	área de projeção da tampa no plano horizontal (m^2)
A_n	área de captação da radiação direta incidente (m^2)
A_p	área da placa (m^2)
b	declive da reta ($W/^\circ C$)
C	concentração geométrica (-)
F_1	primeiro coeficiente de mérito ($m^2 K/W$)
F_{1new}	primeiro coeficiente de mérito (novo) ($m^2 K/W$)
F_2	segundo coeficiente de mérito (-)
F_{2new}	segundo coeficiente de mérito (novo) (-)
$I_{b,n}$	radiação direta no plano horizontal (W/m^2)
I_c	radiação solar como seria medida por um piranómetro no plano perpendicular à radiação incidente (W/m^2)
I_d	radiação difusa no plano horizontal (W/m^2)
I_h	radiação global no plano horizontal (W/m^2)
I_{hi}	radiação solar média no intervalo de tempo i (W/m^2)
I_{hs}	radiação global na estagnação (W/m^2)
$(MC)'$	capacidade calorífica do sistema (água, recipiente e interior do forno) (J/K)
$(MC)_w$	capacidade calorífica da água (J/K)
P_i	potência de cozedura para o intervalo de tempo i (W)
P_s	potência de cozedura padronizada (W)

Q	calor útil (J)
T ₁	temperatura inicial da água (°C)
T ₂	temperatura final da água (°C)
T _a	temperatura ambiente (°C)
T _{as}	temperatura ambiente na estagnação (°C)
T _p	temperatura da placa (°C)
T _{ps}	temperatura da placa na estagnação (°C)
T _{w1}	temperatura inicial da água (40°C)
T _{w2}	temperatura final da água (80°C)
U _L	coeficiente global de perda de calor (W/m ² K)

Acrónimos

ASAE	<i>American Society of Agricultural Engineers</i>
ASABE	<i>American Society of Agricultural and Biological Engineers</i>
BIS	<i>Bureau of Indian Standards</i>
CNUAH	Conferência das Nações Unidas Sobre o Ambiente Humano
CPC	<i>Compound Parabolic Concentrator</i>
IPES	Instituto Português de Energia Solar
PNUA	Programa das Nações Unidas para o Ambiente
UV	Radiação Ultravioleta

Símbolos Gregos

β	ângulo de inclinação do vidro (°)
δ	declinação solar (°)
ΔT	diferença de temperatura (°C)
η ₀	eficiência ótica (-)

η_t	eficiência térmica (-)
η_{tnew}	eficiência térmica (novo) (-)
Θ	ângulo que a radiação incidente faz com a normal no local de teste ao meio dia solar ($^\circ$)
Θ_a	ângulo de aceitação ($^\circ$)
λ	latitude do lugar ($^\circ$)
ρ	refletividade do espelho (-)
ρ_{ground}	refletividade do solo (-)
τ	tempo entre T_{w1} e T_{w2} (min)
τ_0	tempo que a água vai da temperatura ambiente até a ebulição (min)
$\tau_{0medido}$	tempo que a água vai da temperatura ambiente até a ebulição, medido através do ensaio experimental (min)
τ_{0new}	novo tempo que a água vai da temperatura ambiente até a ebulição (min)
τ_1	tempo entre T_{w1} e a temperatura de estagnação (min)
ω_t	ângulo correspondente ao tempo solar ($^\circ$)

1. Introdução

1.1. Contextualização

A preocupação com o estado do ambiente no planeta manifestou-se pela primeira vez em 1972 aquando da Conferência das Nações Unidas Sobre o Ambiente Humano (CNUAH), e da qual resultou a criação pela Assembleia Geral das Nações Unidas, do Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA). Desta conferência nasceu a Declaração do Ambiente que no seu Princípio 1º afirma, que o Homem tem direito a viver "*num ambiente cuja qualidade lhe permita viver com dignidade e bem-estar, cabendo-lhe o dever solene de proteger e melhorar o ambiente para as gerações atuais e vindouras*"[3].

Neste contexto, é cada vez mais pertinente preservar o meio ambiente e arranjar soluções para mitigar os problemas associados. Um dos problemas de enorme preocupação é o fenómeno da desflorestação e, isto, reflete-se em várias regiões do mundo. Tendo em conta que 1/3 das populações no mundo usam madeira para cozinhar [4], o crescimento global da população e o supracitado impasse ambiental é imprescindível pensar numa solução para complementar ou substituir as cozinhas tradicionais. Segundo Funk [5], o aumento da crescente necessidade de obter soluções alternativas para cozinhar, tem despertado interesse de investigadores e tem proporcionado desenvolvimentos de fornos solares. As suas valências, tais como, a utilização de uma fonte de energia limpa, altas performances e facilidades de transporte torna-os como soluções interessantes. Os fornos solares têm sido também muito apreciados no mercado de lazer nos países industrializados, onde são vistos como um produto muito útil para ocasiões ao ar livre e a qualidade extra e o sabor da comida são cada vez mais valorizados [4]. No entanto, é muito pertinente assegurar alta performance e altas temperaturas. Os ensaios que se têm realizados cumprem requisitos da norma proposta em [1,2] com definição e medidas contraditórias que precisam de ser averiguados. Neste sentido, é necessário apresentar propostas coerentes para a resolução deste importante tópico e dar uma colaboração profícua para a elaboração de uma norma mais eficaz e útil.

A finalidade bem patente deste trabalho, será realizar os ensaios a fim de calcular novos *coeficientes de mérito*, que permitem comparar a performance térmica dos diferentes fornos e iniciar o processo de definição de um novo procedimento que, posteriormente, possa vir a ser proposto para uma nova norma de ensaio de fornos. O novo procedimento

permite calcular novos valores dos coeficientes de mérito, e estes serão testados na sua capacidade preditiva.

1.2. Estado da Arte

A necessidade de cozinhar utilizando a energia solar levou o cientista francês-suíço Horace de Sausurre, no século 18, a construir o primeiro forno solar, que era uma estufa em miniatura com cinco camadas de caixas de vidro sobre uma mesa preta, com o propósito de cozinhar frutas. Daí, surgiram várias experiências alicerçadas na investigação feita por Sausurre [6,7,8]. Na literatura encontram-se também fornos solares de tipo painel e de tipo concentrador com geometrias distintas. No segundo capítulo apresentar-se-á de forma sucinta os diferentes tipos de fornos solares de concentração [9]. Contudo, esta dissertação só aborda os fornos solares de tipo caixa, isto é, que são os mais comuns. O tipo de norma a desenvolver para os demais terá de ser distinta.

1.2.1. Forno Solar de tipo caixa

As invenções dos fornos solares do tipo caixa remontam os anos 1767, quando o cientista francês-suíço Horace de Sausurre, aplicou o princípio de efeito de estufa, a chamada *solar heat trap*, e criou uma estufa em miniatura com cinco camadas de caixas de vidro sobre uma mesa preta, com o objetivo de cozinhar frutas. Mais tarde, construiu um forno com duas caixas de pinho cobertas com três camadas de vidro e, posteriormente, adicionou isolamento de lã entre as duas caixas [6,7,8].

Um século depois, o matemático francês Augustin Mouchot, com o objetivo de utilizar a energia solar para ferver a água para as máquinas a vapor, combinou o conceito de *heat trap* e *burning mirror* (espelho usado para concentrar a radiação solar [10]) e, assim, criou um forno solar eficiente, com uma caixa isolada [7,8].

Calver [11], inventou um forno solar de uso doméstico com duas caixas, sendo a caixa interna ligeiramente menor do que a caixa exterior, de modo a deixar a circulação do ar entre as duas caixas ou a utilização de um material isolante.

Embora os fornos solares do tipo caixa tenham sido já desenvolvidos no passado, esta invenção ganhou maior primazia com os estudos e desenvolvimentos realizados pela cientista americana Maria Telkes, nos meados do século 20. Maria Telkes realizou trabalhos experimentais, no âmbito do Projeto da Fundação *Ford*, que visavam construir fornos solares de baixo custo para doar, principalmente, às pessoas que residiam em

regiões tropicais áridas. Telkes construiu um forno solar do tipo caixa triangular com uma inclinação de 30° com a horizontal, que albergava uma cobertura de vidro duplo e 4 refletores alargados [8,12].

Collares Pereira e Almeida [4], descreveram e testaram um novo forno de tipo caixa que incorpora uma ótica não formadora de imagem do tipo CPC, que permite melhorar a performance térmica e ótica do forno. Este forno para além do refletor normal, incorpora também mais um espelho *booster* que faz aumentar a concentração da radiação para o interior do forno. Neste trabalho utilizaram-se dois fornos supracitado, um sem o espelho *booster* e o outro com o *booster*.

Em [13], Kurt et al. queriam relacionar o efeito da geometria da caixa do forno com a sua performance térmica, e contruíram um forno com uma caixa interior cilíndrica.

Baseado no forno descrito em [4], a empresa Portuguesa SUN OK [14], produziu dois fornos de tipo caixa, de cortiça, com dimensões diferentes, com vidros inclinados para minimizar a condensação da água. Neste trabalho utilizaram-se os dois fornos mencionados [4,14].

1.2.2. Normalização

Mullick [1], apresentou procedimentos de ensaios e equações que permitem avaliar a performance térmica dos fornos do tipo caixa. Mais tarde, em 1996, *Mullick* [15] fez experiências para validar o coeficiente de mérito F_2 , que fora proposto por ele em [1], calculando este valor por dois procedimentos diferentes e comparou os resultados. As equações propostas por *Mullick* em [1], posteriormente constituiu numa norma de ensaio proposta pela *BIS – Bureau of Indian Standards* [2]. Contudo, só em 1997 é que foi proposto o procedimento internacional padrão para o ensaio de fornos solares, na Terceira Conferência Mundial sobre Culinária Solar e, três anos depois, *Funk* [5] fez estudos para revalidar a norma proposta nesta conferência. Ele defende que é necessário criar uma norma com uma medida comum, no qual pode ser usada em diferentes locais, em diversas condições climáticas e que facilita a partilha dos resultados entre vários investigadores [5]. Mais tarde esta norma viria a ser adotada e publicada pela *ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, no qual ficou conhecida como norma *ASAE S580* [16]. A norma proposta pela *ASABE*, só avalia a potência de cozedura dos fornos,

pois, segundo eles, só assim se consegue comparar os vários tipos de fornos solares existentes.

Em [17] foi proposto uma nova norma mundial para ensaiar fornos solares, em que se leva em consideração alguns parâmetros relevantes, tais como, temperatura de estagnação, custo por *watt* fornecido e o peso do forno. Os resultados foram apresentados de forma a que facilita a compreensão de usuários comuns.

Em [18] apresenta-se uma proposta de procedimento para a avaliação do comportamento térmico de cozinhas e fornos solares, com o fito de propor uma nova norma de ensaios.

Contudo, as normas atuais não caracterizam muito bem os fornos solares de tipo caixa com concentração. Para além disso, a variação sazonal da área de captação da radiação solar incidente é um tópico que não deve ser descartado, uma vez que é um dos elementos cruciais na interpretação da performance dos fornos solares de tipo caixa e nas normas atuais não a prestigiam. Com este trabalho pretende-se medir e definir novos coeficientes de mérito e explicar, detalhadamente, a forma como se calcula a massa de água necessária para o cálculo de F_2 , as suas variações sazonais com área de captação da radiação incidente e entre outros aspetos.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos. No primeiro capítulo faz-se uma introdução ao tema e as motivações que levaram a realizar esse trabalho. Nesta mesma secção abordar-se-á o estado da arte dos fornos solares de tipo caixa e da normalização dos fornos.

No segundo capítulo, serão apresentados os fundamentos teóricos dos vários tipos de fornos existentes, dando maior ênfase aos fornos solares de tipo caixa (sobre o qual esta dissertação incide), fala-se da configuração, ótica e dimensões dos fornos testados.

No terceiro capítulo, fala-se da forma como se calculam os coeficientes de mérito existentes e dos novos procedimentos propostos, com vista a caracterizar melhor os fornos solares de tipo caixa com concentração.

No quarto capítulo, mencionam-se os ensaios efetuados, dando ênfase, aos equipamentos utilizados, ao programa utilizado para aquisição dos dados das temperaturas das placas de absorção dos fornos e das temperaturas da água, aos procedimentos e aos ensaios

realizados, e todas as explicações detalhadas que os abrangem. Foram utilizados dois tipos de fornos solares (SUN COOK e SUN TASTE, fornecidos pela empresa SUNOK) do tipo caixa com concentração, do tipo CPC.

No quinto capítulo, apresentam-se os resultados dos ensaios realizados e uma análise dos mesmos. Faz-se uma comparação dos coeficientes de mérito atuais e dos novos coeficientes propostos utilizando os fornos SUNCOOK e SUNTASTE. Seguidamente, faz-se um estudo do efeito da sazonalidade, ou seja, o estudo da possibilidade de medir os coeficientes de mérito em outras alturas do ano.

No sexto capítulo, faz-se a caracterização dos fornos pela potência, através dos resultados dos ensaios com a água, realizados em épocas de ano diferente.

Por fim, versa-se a conclusão do trabalho, reflexão e discussão dos resultados obtidos e perspectivas de aperfeiçoamento. Propõe-se ainda, a inclusão dos novos coeficientes propostos numa futura nova norma de ensaios.

O trabalho desta dissertação deu origem a alguns trabalhos científicos que se anexam no final.

2. Fundamentação Teórica

Neste capítulo apresentam-se vários fornos solares de tipo caixa existente e, seguidamente, faz-se uma descrição detalhada dos fornos ensaiados, i.e., fala-se das suas configurações, das suas óticas e as suas dimensões.

2.1. Forno Solar de tipo caixa

Como já foi supramencionado, a história do forno solar teve os seus primórdios com a invenção do forno solar de tipo caixa desenvolvido pelo cientista *Horace de Sausurre*.

O princípio de funcionamento do forno solar de tipo caixa visa converter a radiação eletromagnética em energia térmica, que será transferida para o alimento. O forno solar de tipo caixa, normalmente, é constituído por uma caixa isolada com uma chapa absorvedora, negra no fundo, onde se coloca o recipiente com os alimentos a cozinhar, uma cobertura transparente de vidro e com superfícies refletivas [19], pode ser uma caixa simples ou pode usar um espelho refletor que aumenta a quantidade de energia refletida para o interior da caixa.

Nas figuras seguintes apresentar-se-á vários conceitos de fornos solares de tipo caixa existentes.

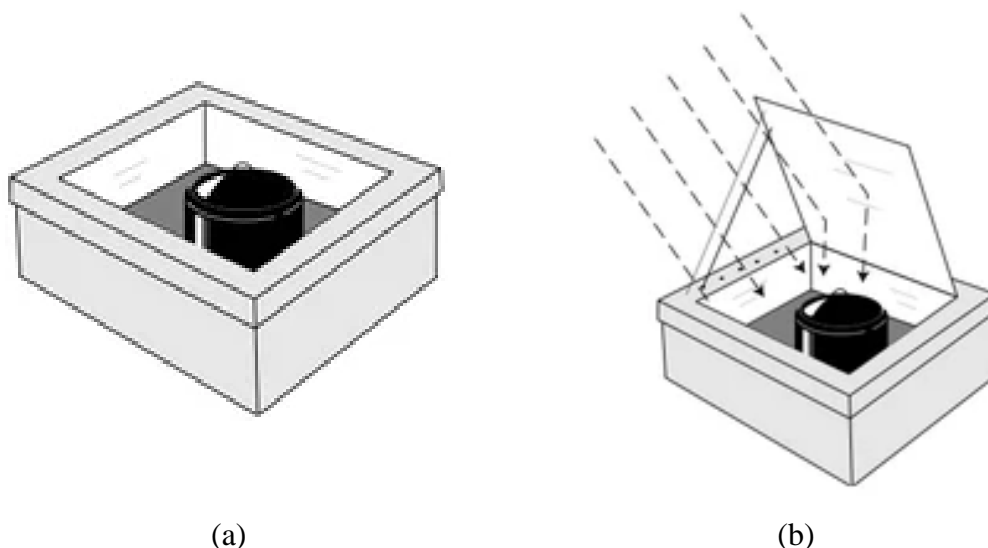


Figura 2.1 - Forno solar de tipo caixa com vidro plano (a) simples; (b) com o espelho refletor [20].

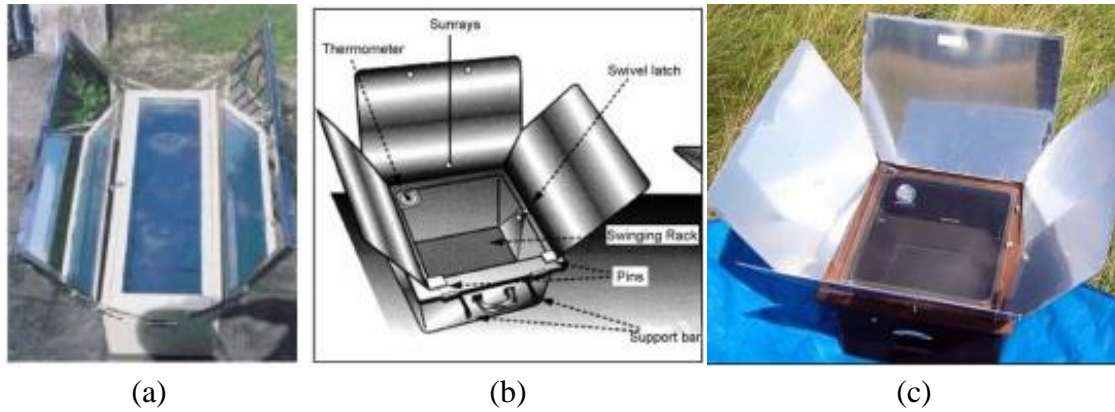


Figura 2.2 – Forno solar de tipo caixa (a) – com dois refletores; (b) – três refletores; (c) – quatro refletores [21].

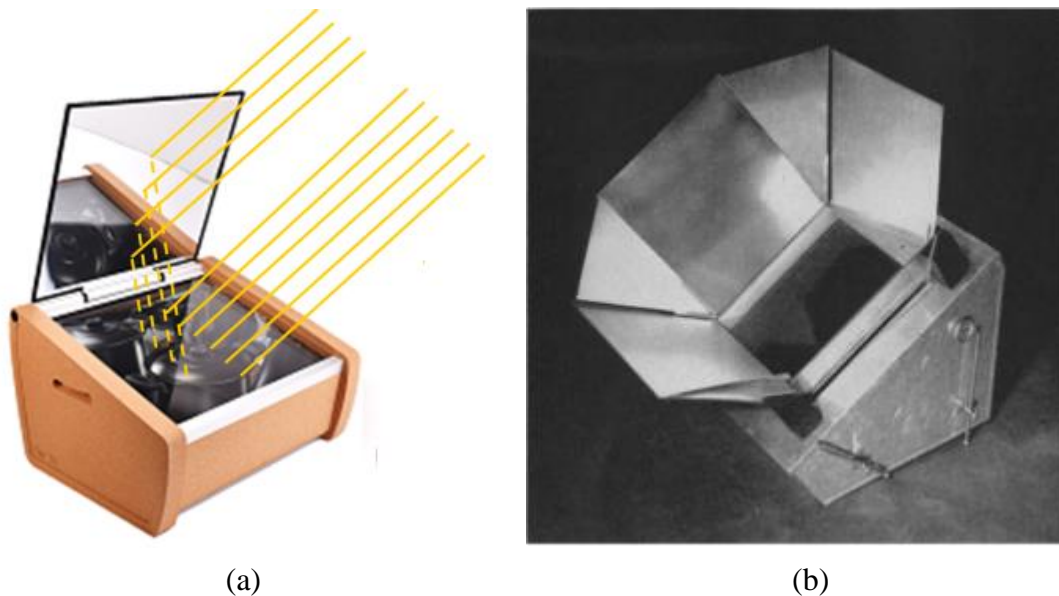


Figura 2.3 - Forno solar de tipo caixa com o vidro inclinado (a) - com refletor simples [14]; (b) - com oito refletores [12].

2.2. Forno solar de tipo painel

O forno solar de tipo painel é uma tecnologia bastante simples, acessível e barata. Este forno possui uma base plana refletora e várias superfícies refletoras a volta desta base, que focam a radiação no recipiente com os alimentos. O recipiente com os alimentos não se encontra isolado do meio ambiente [9].



Figura 2.4 - Forno solar de tipo painel [Adaptado de 21].

2.3. Forno solar de tipo concentrador

O princípio de funcionamento destes tipos de forno visa concentrar a radiação solar num foco, onde se encontra o pote. Estes fornos utilizam óticas de concentração na forma de lentes ou espelhos que lhes permitem atingir altas temperaturas, no entanto, carecem do isolamento. Ou seja, tem uma grande perda por convecção com o meio ambiente. Os fornos de tipo concentrador têm menos tempo de cozedura equiparado aos outros tipos, todavia, os seus custos são mais elevados e, devido a alta concentração podem causar queimaduras e danos oculares aos usuários [9]. Por outro lado, necessitam de acompanhamento durante a cozedura para se manterem, convenientemente, orientados em relação ao sol.

Na figura 2.5 pode-se ver vários tipos de fornos solares de concentração [21].

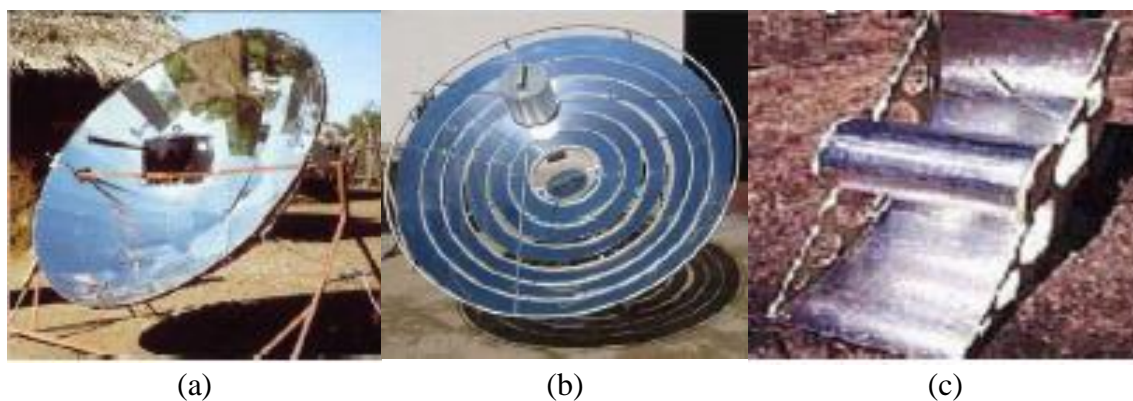


Figura 2.5 - Forno solar de concentração (a)- Parabolóide; (b)- Fresnel; (c)- Cilindro-parabólico.

2.4. Configuração, ótica e dimensões dos fornos estudados na dissertação

Nesta secção fala-se das características dos fornos solares de tipo caixa SUNCOOK e SUNTASTE, tecnologia portuguesa até então líder mundial, no que tange, a performance térmica e ótica dos fornos solares de tipo caixa. O forno solar SUNCOOK foi desenvolvido pela empresa SUN CO que mais tarde foi substituído pela empresa SUN OK e, que produz atualmente um novo forno de cortiça, designado SUNTASTE. A empresa SUN OK, que é associado do Instituto Português de Energia Solar (IPES), disponibilizou os fornos para serem avaliados e, estes foram os fornos utilizados durante os ensaios realizados no âmbito desta dissertação.

2.4.1. SUNCOOK

O SUNCOOK descrito e testado em [4], é um forno solar de tipo caixa feito de plástico com uma cobertura transparente de vidro duplo, uma placa absorvedora preta de alumínio (2 mm de espessura) revestido com teflon na parte superior e um refletor feito de folhas de alumínio anodizado altamente refletivas, que possui um espelho auxiliar feito com o mesmo material, no qual designamos de um *booster*, e espelhos interiores em formas de CPC assimétricos, assim assimilando o conceito de concentrador ideal fundamentada por Winston [22], em uma caixa. Ambos os espelhos refletores possuem uma espessura de 0,4 mm e uma refletividade total para o espectro solar de 0,87 [4]. Neste trabalho este forno foi utilizado.

O plástico exterior do SUNCOOK é resistente a radiação ultravioleta (UV) e o interior pode resistir uma temperatura de estagnação de cerca de 200°C sem deformação do material [4].

Na figura 2.6 mostra-se o forno SUNCOOK, uma caixa fechada e outra aberta com o espelho refletor e o seu respetivo *booster*.



(a)



(b)

Figura 2.6 - O SUNCOOK: (a)- Caixa fechada; (b) – tampa aberta com o refletor e o *booster*.

A utilização da ótica *non-imaging* no SUNCOOK permite concentrar a radiação solar e, por sua vez, possibilita a utilização do SUNCOOK em dias parcialmente nublados. Assim, permite que o forno atinja temperaturas mais altas e que tenha um menor tempo de pré-aquecimento [4], comparado à um simples forno de tipo caixa.

As paredes internas do SUNCOOK são compostas por dois CPCs assimétricos idênticos em uma direção 2D e mais dois CPCs assimétricas distintos na direção ortogonal. O SUNCOOK tem um fator de concentração médio, referido na referência [4], como sendo $1.53 \times 1.46X \approx 2.2X$, com um espelho refletor ajustável e um ângulo de aceitação de 45° na direção longitudinal (este-oeste), 66° (trás) e 63° (frente) na direção transversal [4].

Na tabela 2.1 ilustra-se os ângulos de aceitação dos CPCs supramencionados e os seus respectivos *stationarity time*, com o espelho lateral.

Tabela 2.1- Ângulos de aceitação dos CPCs do SUNCOOK, e os seus respetivos *stationarity time* previstos.

CPC	Ângulo de aceitação Θ_a ($^\circ$)	<i>Stationarity time</i> (h)
Esquerda e direita	45	3
Frente	66	4.4
Trás	63	4.2

A figura 2.7 mostra duas seções transversais do SUNCOOK, e as suas respetivas paredes interiores de CPCs assimétricos [4].

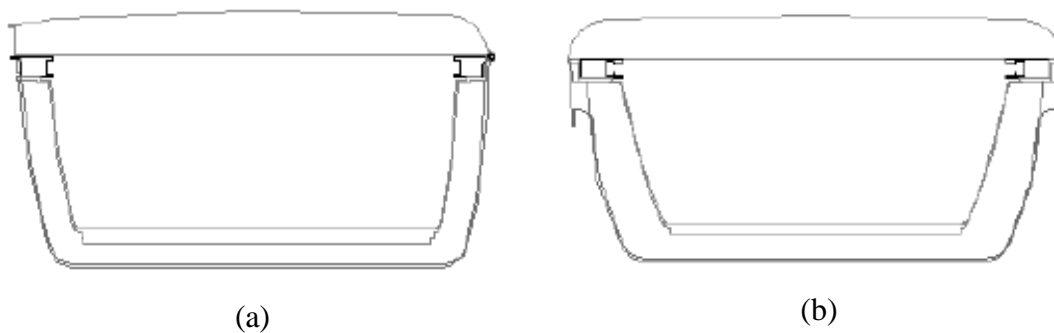


Figura 2.7 – Seções transversais do SUNCOOK (a) Frente e trás; (b) esquerda e direita – mostrando os CPCs assimétricos.

A tabela infra exposta contém algumas dimensões relevantes do forno SUNCOOK [4].

Tabela 2.2 - Dimensões relevantes do forno SUNCOOK.

Dimensões	SUNCOOK
Exterior (caixa fechada) (mm)	580×550×280
Área do vidro A_c (mm)	455×460
Área da placa absorvedora A_p (mm)	350×410

2.4.2. SUNTASTE

À semelhança do forno SUNCOOK descrito anteriormente, a empresa SUN OK criou dois novos fornos de cortiça, com dimensões diferentes, que designaram de SUNTASTE COMPACT e SUNTASTE LARGE como pode ser observado na figura 2.8. O novo forno SUNTASTE tem uma placa absorvedora de alumínio anodizado (2,5 mm de espessura) que pode ser removida e um vidro duplo com uma inclinação de 17° que permite a diminuição/eliminação da condensação da água no vidro da cobertura [23]. As paredes laterais, da frente e de trás são feitas de cortiça.



Figura 2.8 - Vistas de frente e de trás do SUNTASTE (COMPACT e LARGE).

O forno SUNTASTE incorpora também uma ótica *non-imaging* do tipo CPC, que lhe permite alcançar temperaturas de estagnação mais alta e, conseqüentemente, uma melhor performance. Os fornos SUNTASTE (COMPACT e LARGE) são constituídos por duas paredes laterais internas em forma de dois CPCs assimétricos idênticos e uma parede frontal que possui a mesma ótica, mas com ângulo de aceitação diferente. O SUNTASTE (COMPACT e LARGE) têm uma concentração média de 2.2X e 2.1X (o cálculo da concentração média é apresentado em anexo 1), respetivamente, com um espelho refletor ajustável. Na figura 2.9 mostra-se a *cross section* do SUNTASTE no plano transversal [23].

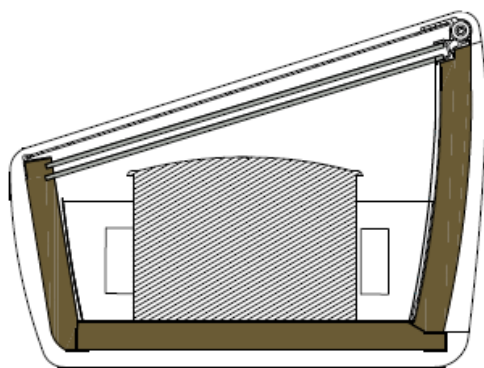


Figura 2.9 – *Cross section* do SUNTASTE no plano transversal.

A tabela seguinte mostra os ângulos de aceitação dos CPCs e os *stationarity time* previstos [23], com o espelho lateral.

Tabela 2.3 – Ângulos de aceitação dos CPCs do SUNTASTE (COMPACT e LARGE), e os seus respetivos *stationarity time* previstos.

CPC	Ângulo de aceitação Θ_a ($^\circ$)	<i>Stationarity time</i> (h)
Frontal	59.8	4.0
Lateral	48.6	3.2

Na tabela 2.4 expõe-se algumas dimensões importantes dos fornos SUNTASTE (COMPACT e LARGE) [23].

Tabela 2.4 – Dimensões dos fornos SUNTASTE COMPACT e SUNTASTE LARGE.

SUNTASTE	Dimensão exterior (cm)	Área da placa absorvedora (cm)	Área do vidro (cm)
COMPACT	52×43×32	36×30	44×36
LARGE	66×43×32	50×30	58×36

3. Coeficientes de mérito e “performance” térmica do forno tipo caixa

Neste capítulo fala-se da performance térmica do forno, mais concretamente, das definições convencionais sobre os coeficientes de mérito existentes e dos novos coeficientes de mérito propostos nesta dissertação.

3.1. Definições convencionais

A necessidade de avaliar a performance térmica dos fornos solares de tipo caixa levou Mullick [1] a fomentar o seu espírito de pesquisa sobre esse assunto. Ele refere que a análise térmica completa do forno é complexa, devido às transferências de calor tridimensional, em regime transiente. Portanto, defende que o procedimento de padronização deve ser razoavelmente simples para facilitar a implementação. Segundo Mullick, os procedimentos seguidos atualmente consistem na determinação do:

- ✚ tempo de cozedura de diferentes alimentos;
- ✚ tempo necessário para o aquecimento sensível de uma quantidade conhecida de água até o ponto de ebulição.

Mullick alega que o segundo método do procedimento supracitado é melhor, dado que, não envolve incertezas sobre as variações da qualidade dos ingredientes usados e nem sobre quando exatamente o alimento fica completamente cozido. Contudo, o tempo de aquecimento sensível depende das variáveis climáticas - radiação solar e temperatura ambiente [1].

Para permitir a avaliação de fornos solares e comparações entre fornos, Mullick em 1987 [1], pensou que seria necessário definir parâmetros dos fornos que sejam mais ou menos independentes das variáveis climáticas e, então, sugeriu um método para avaliar a performance térmica dos fornos solares de tipo caixa. Ele propôs dois parâmetros para avaliar a performance térmica do forno, os designados coeficientes de mérito (F_1 e F_2). O coeficiente de mérito F_1 é a razão entre a eficiência ótica e o coeficiente da perda de calor. F_1 obtém-se a partir do teste de estagnação da placa do forno e, é calculado da seguinte forma [1,24]:

Considerando que a potência do forno é dada por

$$P = A_c \times I_h \times \eta_0 - A_c \times U_L \times (T_p - T_a) \quad (3.1)$$

Onde,

A_c é área da cobertura de vidro, I_h a radiação global recebida pelo forno, η_0 a eficiência ótica, U_L o coeficiente global de perda de calor, T_p a temperatura da placa e T_a a temperatura ambiente.

Como na estagnação $P = 0$, T_p passa a T_{ps} , T_a a T_{as} e I_h a I_{hs} , logo o primeiro coeficiente de mérito é calculado de acordo com a equação 3.2.

$$F_1 = \frac{\eta_0}{U_L} = \frac{T_{ps} - T_{as}}{I_{hs}} \quad (3.2)$$

Onde,

T_{ps} é a temperatura da placa na estagnação, T_{as} a temperatura ambiente na estagnação e I_{hs} a radiação global na estagnação.

Uma eficiência ótica alta e um coeficiente de perda de calor baixo são desejáveis. O coeficiente global de perda de calor é assumido constante nesta análise [1].

Um limite inferior permitido do valor de F_1 pode ser uma medida para garantir um nível mínimo de desempenho térmico. Por exemplo, se for estipulado que F_1 deve ser igual ou superior a 0.12, em uma região onde a radiação solar e temperatura ambiente são $I_{hs} = 800$ W/m² e $T_{as} = 15$ °C, respectivamente, teríamos um valor de T_{ps} maior ou igual a 111 °C. Ao especificar um valor mínimo adequado de F_1 provavelmente entre 0.12 e 0.16, dependendo do clima do país, pode-se assegurar que a temperatura de estagnação da placa seja, suficientemente alta, para que a água atinja a ebulição [1].

O segundo coeficiente de mérito F_2 , está relacionado com a quantidade de água aquecida pelo forno e o tempo de aquecimento da água. A definição de F_2 é descrita seguindo as seguintes equações [1,4,24]:

$$dQ = (MC)'dT_w \quad (3.3)$$

Onde,

$(MC)'$ é a capacidade calorífica do sistema (água, recipiente e interior do forno) e Q o calor útil ganho pela água.

Sabendo que $P = dQ/dt$, a equação (3.3), passa a ser:

$$dt = \frac{(MC)'}{P} \times dT_w \quad (3.4)$$

Assumindo que água é aquecida de uma certa temperatura T_{w1} , no tempo t_1 a uma certa temperatura T_{w2} , no tempo t_2 ($\tau = t_2 - t_1$), sendo I_h e T_a constantes, é possível obter o tempo que a água vai de T_{w1} (40 °C) a T_{w2} (80 °C), fazendo a integração da equação descrita em (3.4), considerando a potência definida na equação (3.1).

$$\tau = -F_1 \times \frac{(MC)'}{A_c \times \eta_0} \times \ln \left[\frac{1 - \frac{1}{F_1} \times \left(\frac{T_{w2} - T_a}{I_h} \right)}{1 - \frac{1}{F_1} \times \left(\frac{T_{w1} - T_a}{I_h} \right)} \right] \quad (3.5)$$

Como pode ser visto na equação (3.5), o τ depende das condições climáticas I_h e T_a , que variam durante o tempo de teste. O parâmetro $(MC)'$, capacidade calorífica do sistema (água, recipiente e interior do forno) não é conhecido. Como a capacidade calorífica do recipiente é pequena em relação a capacidade calorífica da água e a capacidade calorífica do interior do forno é difícil de especificar, será possível fazer uma aproximação, introduzindo um novo parâmetro C_r , que é a razão entre a capacidade calorífica da água e a capacidade calorífica do sistema [1].

Definindo $C_r = \frac{(MC)_w}{(MC)'}$ é possível escrever o segundo coeficiente de mérito com base na equação (3.5), como pode ser visto na equação (3.6).

$$F_2 = \eta_0 \times C_r = F_1 \times \frac{(MC)_w}{A_c \tau} \ln \left[\frac{1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{w1} - T_a}{I_h} \right)}{1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{w2} - T_a}{I_h} \right)} \right] \quad (3.6)$$

Onde,

$(MC)_w$ é o produto entre a massa de água e o seu calor específico, T_{w1} a temperatura inicial da água (40 °C), T_{w2} a temperatura final da água (80 °C), T_a e I_h a temperatura ambiente média e a radiação global média, respetivamente, entre o intervalo de tempo τ .

Com a equação descrita em (3.6) é possível calcular um novo parâmetro pertinente na análise da performance do forno que é o tempo de ebulição da água τ_0 , i.e., é o tempo que a água tarda da temperatura ambiente até a temperatura de ebulição, que é dependente da

¹ As temperaturas T_{w1} e T_{w2} são definidas em [18].

altitude do lugar em relação ao nível do mar. Este tempo pode ser calculado da seguinte forma [1]:

$$\tau_0 = -\frac{F_1}{F_2} \times \frac{(MC)_w}{A_c} \ln \left[1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{99.2^2 - T_a}{I_h} \right) \right] \times \frac{1}{60} \quad (3.7)$$

O tempo que a água tarda da temperatura ambiente até a ebulição (τ_0) é expresso em minutos.

3.2. A proposta de definição: novos coeficientes de mérito

Mullick foi um dos pioneiros na matéria de normalização e avaliação da performance dos fornos solares de tipo caixa. Os coeficientes de mérito propostos por *Mullick* em [1] para avaliar a performance térmica dos fornos solares de tipo caixa, integrados na norma proposta em [2], não permitem distinguir entre os vários tipos de geometrias de fornos solares de tipo caixa, inclusive esta norma recomenda que se o forno estiver um espelho refletor, este deve ser coberto com um pano preto, o que, obviamente, diminui a performance térmica dos fornos [24].

Segundo [1], é muito pertinente avaliar o tamanho e a qualidade do espelho *booster*, dado que o *booster* é fora da caixa e que os fabricantes, geralmente, não apresentam nenhuma informação sobre a inclinação do espelho. Assim sendo, apresentam um possível procedimento de padronização que relaciona o tamanho do espelho com a sua refletividade. Relatam ainda, que devido aos valores mais baixos da radiação solar numa superfície horizontal no Inverno, especialmente em locais de latitudes mais elevadas, a temperatura de estagnação da placa pode não ser alcançada, sem a utilização de um espelho *booster* e defendem que:

- ✚ o forno deve ter um espelho *booster* de pelo menos o mesmo tamanho que A_c e refletividade superior a 0.5, para compensar a radiação global inferior, devido ao efeito do cosseno θ ;
- ✚ o produto entre o tamanho do espelho e a sua refletividade deve ser mantido acima de $A_c/2$;

² Temperatura de ebulição da água medido à altitude do lugar de teste (253m acima do nível do mar) [25].

- ✚ o tamanho apropriado do espelho *booster* deve depender da latitude do local onde o forno será utilizado.

Os procedimentos propostos em [1], embora não falem de fornos solares de tipo caixa com concentração, reconhecem a importância de utilizar um espelho refletor. Mullick chega a afirmar que, devido aos valores da radiação serem mais baixas no inverno, especialmente em locais com latitudes altas, a temperatura de estagnação da placa do forno pode não ser atingida.

Em [1], explica-se como resolver o problema do tamanho do espelho refletor, mas não se explica como relacionar a inclinação do refletor com a mudança sazonal da área de captação da radiação.

Com estes novos procedimentos propostos nesta dissertação, pretende-se explicar de forma clara os novos coeficientes de mérito e apresentar-se um procedimento acessível para que os fornos sejam testados em lugares diferentes, sem sacrificar uma característica importante da proposta de Mullick, e de usar instrumentação mais simples e barata possível.

Neste trabalho pretende-se propor novos coeficientes de mérito, tendo em consideração a ótica do espelho, a inclinação do vidro da cobertura dos fornos e a época do ano em que os ensaios são realizados. Assim, tenciona-se realizar um ajuste aos coeficientes de mérito existentes e aumentar o rigor e a caracterização de várias geometrias de forno solar de tipo caixa.

Segundo Funk [5] e segundo a norma proposta pela ASABE [16], a figura que melhor representa o desempenho térmico do forno é a potência de cozedura efetiva. Esta medida complementa os demais existentes na caracterização dos fornos. Considera-se uma figura de desempenho muito pertinente. No entanto, a potência de cozedura depende da massa de água que vai ser utilizada que, por sua vez, depende da área de captação da radiação incidente. Portanto, os novos procedimentos explicam como se calcula esta área, o que faz com que a massa de água não seja sempre igual, mas sim, proporcional à área de captação da radiação incidente. Desta forma, os novos procedimentos vão ao encontro de uma caracterização mais abrangente dos fornos solares de tipo caixa, contribuindo para a obtenção de outros parâmetros que qualificam estes fornos.

Como mencionado acima, os coeficientes de mérito propostos em [1], apresentam algumas limitações que dificultam a caracterização de várias geometrias de fornos solar de tipo caixa. Ficam, ainda, alguns assuntos importantes a considerar [24], tais como:

- ✚ Deverá estabelecer-se uma forma *standard* para explicitar a forma como se calcula $(MC)_w$, uma vez que F_2 depende da massa de água aquecida pelos fornos;
- ✚ Deverá procurar resolver-se a ambiguidade em relação a época do ano em que os testes são realizados.

Nas figuras 3.1 e 3.2 ilustra-se o mesmo forno com o vidro plano testado em épocas de ano diferentes [24], e nas figuras 3.3 e 3.4 mesmo forno com o vidro da cobertura inclinado testado em épocas de ano diferentes [23].

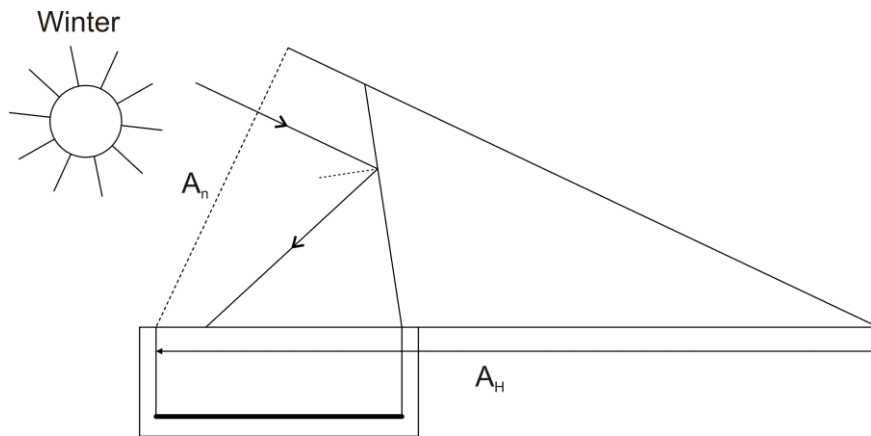


Figura 3.1 - Forno solar de tipo caixa, com vidro da cobertura plano testado no inverno.

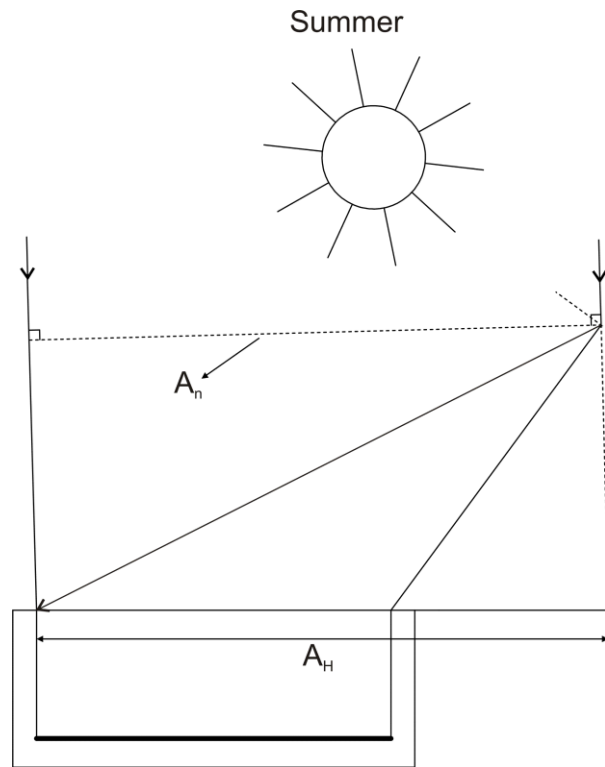


Figura 3.2 - Forno solar de tipo caixa, com vidro da cobertura plano testado no verão.

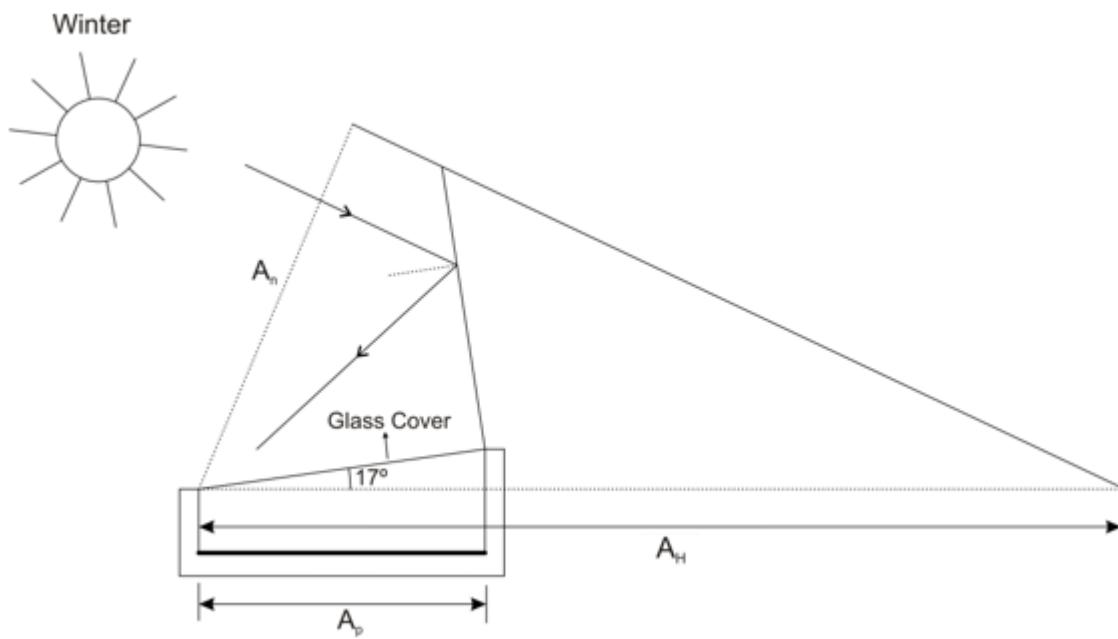


Figura 3.3 - Forno solar de tipo caixa, com vidro da cobertura inclinado testado no inverno.

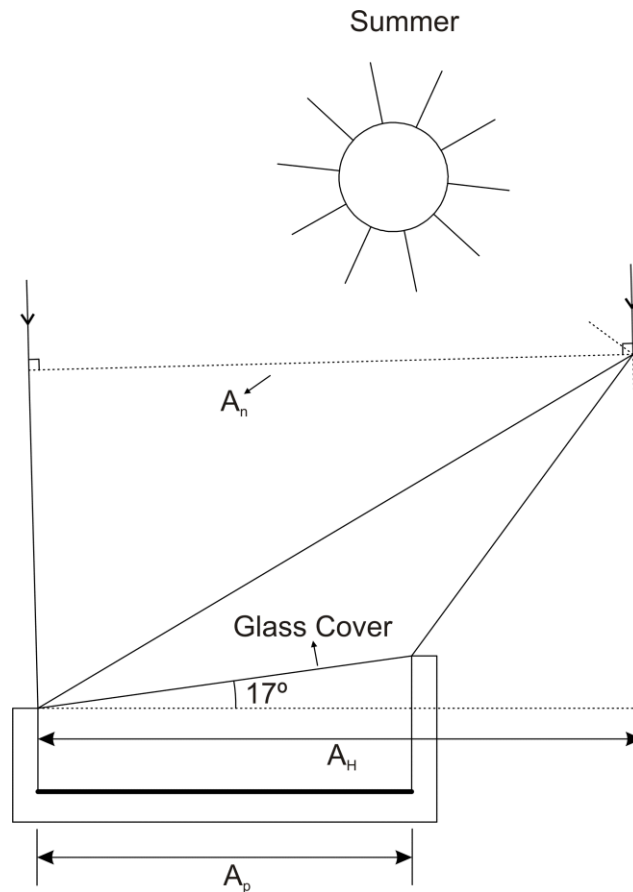


Figura 3.4 - Forno solar de tipo caixa, com vidro da cobertura plano testado no verão.

No que se segue, a nomenclatura A é usada para referir a todas as áreas, no entanto, nas figuras desenhadas, ela aparece como um comprimento. Isso ocorre porque a largura do forno (fora do plano do papel e perpendicular a ele) é um valor (de multiplicação) fixo [24].

Os ângulos das tampas em cada situação exibidos nas figuras 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 correspondem a posição tal que a radiação direta refletida para o interior do forno seja a máxima possível. Isso define uma área de irradiação (perpendicular à radiação direta incidente) A_n , que no verão é maior do que no inverno e, provavelmente, F_1 e F_2 que dependem de A_n , poderão ser muito diferentes em épocas de ano distintas.

Considerando as figuras 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, o A_n pode ser definido como:

$$A_n = A_H \times \cos \theta \quad (3.8)$$

Onde:

A_n é área de captação da radiação direta incidente, A_H a área projetada pela tampa no plano horizontal à altura do vidro da cobertura e Θ o ângulo que a radiação incidente faz com a normal no local do teste ao meio dia solar.

De [26],

$$\cos \theta = \cos \lambda \times \cos \delta \times \cos \omega_t + \sin \delta \times \sin \lambda \quad (3.9)$$

Em que:

λ é a latitude do local, δ a declinação solar para cada dia de teste e ω_t o ângulo correspondente ao tempo solar ($\omega_t = 0$ sendo o valor do ângulo ao meio dia solar).

Depois de considerar a inclinação dos vidros de cobertura dos fornos, épocas do ano distintas em que os fornos são ensaiados e a área de captação da radiação solar direta incidente, é possível escrever novos coeficientes de mérito e obter o novo tempo que uma certa quantidade da massa de água tarda da temperatura ambiente até a ebulição; estes novos parâmetros qualificam e descrevem melhor os fornos solares de tipo caixa, tendo melhor em conta as diferenças e características de fornos diferentes.

A potência libertada pelo forno pode ser calculada da seguinte forma [24]:

$$P = A_n \times I_c \times \eta_0 - A_p \times U_L \times (T_p - T_{air}) \quad (3.10)$$

Sendo, A_p a área da placa de absorção do forno e I_c a soma das irradiações difusa e refletida no plano perpendicular à irradiação incidente (irradiação que seria medida pelo piranómetro nesse plano).

Neste caso, o coeficiente de perda de calor refere-se à área da placa, em vez da área do vidro da cobertura, como citado na equação 3.1.

Devido a possível dificuldade em calcular o termo $A_n \times I_c$, uma aproximação boa e fácil de medir é concebível, como pode ser visto na equação 3.11 [24].

$$A_n \times I_c \cong A_H \times I_h \quad (3.11)$$

Substituindo a equação (3.8) em (3.11), permite verificar-se até que ponto:

$$I_h \cong I_c \times \cos \theta \quad (3.12)$$

Esta aproximação pode ser averiguada, sabendo de [26] que

$$I_c = I_{b,n} + \frac{I_d}{2} (1 + \cos \theta) + \frac{\rho_{ground}}{2} (1 - \cos \theta) I_h \quad (3.13)$$

Onde,

$I_{b,n}$, I_d e I_h são respetivamente a radiação direta, difusa e global no plano horizontal e ρ_{ground} a média da refletividade do solo.

Num dia de céu limpo, considerando os valores de $I_{b,n}$, I_d e I_h respetivamente, a volta dos 900, 100, 1000 ou 550 W/m² (o valor de I_h depende da época do ano, neste caso segundo os testes se realizarem no verão ou no inverno) e ρ_{ground} igual a 0.2, fazendo o θ variar entre 0 e 60°, é possível verificar que a aproximação descrita na equação (3.12) é válida. Para θ igual a zero o resultado é exatamente igual e para θ igual a 60° o resultado varia entre 2-3%, o que valida a aproximação proposta.

Sabendo que parte da radiação incide diretamente na área da cobertura e a outra parte é refletida pelo espelho e que através da cobertura vai chegar ao foco, é possível decompor o A_n em duas partes [24].

$$A_n = A_c \cos(\theta - \beta) + [A_n - A_c \cos(\theta - \beta)] \times \rho \quad (3.14)$$

Em que,

β é o angulo de inclinação do vidro da cobertura do forno.

Assim, a expressão $A_n \times \eta_0$ é equivalente a uma nova expressão $A_n \times \eta_0'$ que já considera a reflexão da tampa [24], ou seja,

$$A_n \times \eta_0 = \{A_c \cos(\theta - \alpha) + [A_n - A_c \cos(\theta - \alpha)] \times \rho\} \eta_0' \quad (3.15)$$

Usando as equações (3.11) e (3.15), a equação 3.10 pode ser reescrita considerando a irradiação incidente sobre o vidro da cobertura, com ou sem a reflexão do espelho refletor da tampa do forno, conforme mostrado infra.

$$P = I_h \times A_H \times \{A_c \cos(\theta - \alpha) + [A_n - A_c \cos(\theta - \alpha)] \times \rho\} \times \eta_0' - A_p \times U_L \times (T_p - T_a) \quad (3.16)$$

Usando a equação (3.8) e (3.16), temos que:

$$P = I_h \times \left\{ A_c \times \frac{\cos(\theta - \beta)}{\cos \theta} + \left(\frac{A_n}{\cos \theta} - A_c \times \frac{\cos(\theta - \beta)}{\cos \theta} \right) \times \rho \right\} \times \eta'_0 - A_p \times U_L \times (T_p - T_a) \quad (3.17)$$

Assim,

$$P = I_h \times A' \times \eta'_0 - A_p \times U_L \times (T_p - T_a) \quad (3.18)$$

Onde,

$$A' = \left\{ A_c \times \frac{\cos(\theta - \beta)}{\cos \theta} + \left[\frac{A_n}{\cos \theta} - A_c \times \frac{\cos(\theta - \beta)}{\cos \theta} \right] \times \rho \right\} \quad (3.19)$$

Tendo em consideração, todas as definições descritas anteriormente, é possível definir novos coeficientes de mérito F_{1new} e F_{2new} [24].

Considerando a equação (3.18), é possível calcular o primeiro coeficiente de mérito F_{1new} . Este coeficiente está relacionado com a temperatura de estagnação da placa de absorção do forno. Como na estagnação P é igual a zero, e T_p passa para T_{ps} , T_a a T_{as} e I_h a I_{hs} , vem:

$$F_{1new} = \frac{\eta'_0}{U_L} = \frac{A_p}{A'} \times \frac{(T_{ps} - T_{as})}{I_{hs}} \quad (3.20)$$

O segundo coeficiente de mérito F_{2new} , pode ser escrito com base nas equações (3.3) e (3.18). Da equação (3.3) sabe-se que, $dQ = (MC)' dT_w$. A potência é definida em [24] como $P = dQ/dt$, logo é possível relacionar as equações (3.3) e (3.18).

$$dt = \frac{(MC)'}{P} \times dT_w \quad (3.21)$$

Integrando a equação (3.21) é possível calcular o tempo que a água vai de T_{w1} (40°C) a T_{w2} (80°C).

$$\tau = -F_{1new} \times \frac{(MC)'}{A_p \times \eta'_0} \times \ln \left[\frac{1 - A_p \times \left(\frac{T_{w2} - T_a}{F_{1new} \times A' \times I_h} \right)}{1 - A_p \times \left(\frac{T_{w1} - T_a}{F_{1new} \times A' \times I_h} \right)} \right] \quad (3.22)$$

Com $C_r = \frac{(MC)_w}{(MC)'}$, escreve-se novo coeficiente de mérito F_{2new} com base na equação (3.22).

$$F_{2new} = \eta'_0 \times C_r = F_{1new} \times \frac{(MC)_w}{A_p \tau} \ln \left[\frac{1 - A_p \left(\frac{T_{w1} - T_a}{A' \times F_{1new} \times I_h} \right)}{1 - A_p \left(\frac{T_{w2} - T_a}{A' \times F_{1new} \times I_h} \right)} \right] \quad (3.23)$$

Das equações descritas em (3.22) e (3.23) calcula-se um novo parâmetro pertinente na análise da performance do forno que é o tempo de ebulição da água τ_{0new} , i.e., é o tempo que a água tarda da temperatura ambiente até a temperatura de ebulição. O parâmetro τ_{0new} calcula-se de acordo com a seguinte equação:

$$\tau_{0new} = - \frac{F_{1new}}{F_{2new}} \times \frac{(MC)_w}{A_p} \ln \left[1 - A_p \left(\frac{99.2 - T_a}{A' \times F_{1new} \times I_h} \right) \right] \times \frac{1}{60} \quad (3.24)$$

O tempo τ_{0new} é expresso em minutos.

4. Ensaio Experimentais: Tipo e procedimentos

Neste capítulo expõe-se os testes experimentais efetuados, mais concretamente, o programa utilizado para a aquisição de dados das temperaturas da água e da placa de absorção do forno, os procedimentos e os vários tipos de ensaios realizados, e todas as explicações detalhadas que os abrangem. Foram utilizados dois fornos solares comerciais de tipo caixa que incorpora uma ótica do tipo CPC (*Compound Parabolic Concentrator*), SUNCOOK e SUNTASTE fornecidos pela empresa SUNOK.

Os testes experimentais realizados seguem os procedimentos propostos em [1,2] em termos de orientações e pré-aquecimento do forno e [18] em termos da quantidade da massa de água a ser aquecida. Estes testes visam calcular a temperatura de estagnação da placa de absorção dos fornos e as temperaturas das massas de água aquecidas pelos mesmos.

Para a aquisição dos dados das temperaturas supracitadas, usou-se um multímetro *agilent* 34980A, que é ligado ao computador por um cabo de rede. O multímetro possui oito *slots* que permite a ligação do *multiplexer switch modules*. Usou-se um *multiplexer switch module* com vinte e cinco canais e os termopares ligam-se a estes canais. Nos ensaios realizados usou-se cinco termopares do tipo T (cobre/constantan), que permitem a obtenção dos valores das temperaturas de estagnação da placa ou da água, nos quatro fornos, e a temperatura ambiente. Com recurso ao *software LabVIEW* adquire-se os dados das temperaturas.

Nas figuras 4.1 e 4.2, mostram-se respetivamente, o multímetro utilizado durante os testes, o *multiplexer switch module* do multímetro com a ligação dos termopares e o aparato experimental (este difere do tipo de teste realizado, como pode ser visto nas seções seguintes) com uma caixa onde se faz a medição da temperatura ambiente.



Figura 4.1 - Multímetro digital usado durante os testes.



Figura 4.2 - Aparato experimental.

Para a aquisição dos dados da radiação solar global na superfície horizontal usou-se um piranómetro da *Kipp and Zonen*, modelo CMP11. O instrumento mencionado, pode ser classificado de acordo com a norma ISO 9060:1990. Esta norma classifica os piranómetros, de acordo com as suas características, em três critérios distintos: *secondary standard, first class, second class* [27]. O piranómetro utilizado pertence a classe *secondary standard* [27], no entanto, reitera-se que, com os novos procedimentos pretende-se utilizar os instrumentos mais baratos e simples possíveis. As especificações técnicas do piranómetro *Kipp and Zonen-CMP11*, podem ser vistos em anexo 2.

Na figura 4.3 mostra-se a vista em corte do piranómetro utilizado para a aquisição dos dados e os seus componentes.

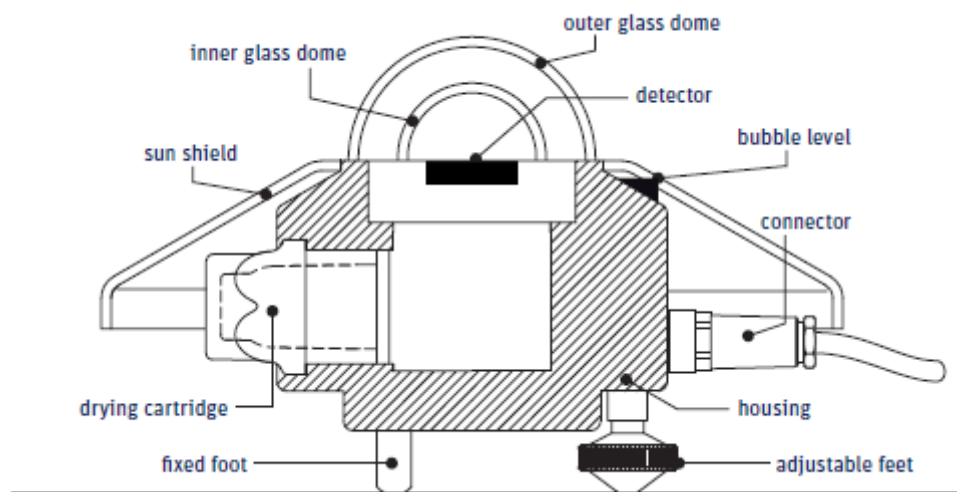


Figura 4.3 - Piranómetro *Kipp and Zonen-CMP11* e os seus componentes.

O piranómetro *Kipp and Zonen*, CMP11 possui um sensor térmico passivo denominado de termopilha. A termopilha do supracitado piranómetro dá uma resposta à energia total absorvida por um único revestimento de superfície preta desenvolvido pela *Kipp and Zonen*, que é espectralmente não seletivo. A termopilha aquece e o calor gerado flui através de uma resistência térmica a um dissipador de calor, o *pyranometer housing*. A diferença de temperatura através da resistência térmica do detetor é convertida em uma pequena voltagem como uma função da irradiância absorvida [28].

4.1. Ensaio de temperatura de estagnação da placa

Os ensaios realizados seguem as normas propostas em [1,2,18]. O ensaio de estagnação da placa incide-se sobre a medição da temperatura de estagnação da placa de absorção do forno. Na norma indiana [2], o forno deve ser ensaiado com o refletor tapado com um pano preto, o que faz com que a temperatura de estagnação da placa do forno seja menor. A temperatura atingida não será a maior possível e está a ser afetada a performance do forno, portanto, neste ensaio os fornos foram ensaiados usando os seus refletores, que faz com que a concentração seja maior e, conseqüentemente, a temperatura da placa será maior. Assim sendo, com este ensaio consegue-se saber qual a temperatura máxima que o forno pode atingir num certo dia e, ainda, permite calcular o primeiro coeficiente de mérito F_1 , que é a razão entre a eficiência ótica do forno e as perdas térmicas. Assim, possibilita-nos avaliar a performance do forno. O ensaio inicia-se por volta das 10 horas solares. O termopar é colocado no meio da placa de absorção de cada forno ensaiado. Durante o ensaio os fornos são orientados de 15 em 15 minutos, de forma a que sigam o movimento aparente do sol.



Figura 4.4 – Ensaio de estagnação da placa de absorção do forno.

4.2. Ensaio de temperatura de estagnação da placa com o refletor tapado

Este ensaio segue a norma proposta em [2], baseada nas definições apresentadas em [1] e, visa medir a temperatura de estagnação da placa de absorção, com o espelho refletor dos fornos tapados. Em termos de orientação dos fornos, da hora do início do ensaio e a colocação dos termopares, os procedimentos são feitos de forma análoga ao descrito na secção 4.1.



Figura 4.5 - Ensaio de estagnação da placa de absorção do forno, com os espelhos refletores dos fornos tapados.

4.3. Ensaio com água

O ensaio com a água está relacionado com o tempo que uma dada massa da água tarda dos 40°C aos 80°C e dos 40°C até a ebulição (a temperatura de ebulição depende da altitude do lugar, 99.2 °C para o lugar onde os ensaios foram realizados ver [25]). Os ensaios realizados seguem as normas propostas em [1,2,18] tendo como referência também alguns parâmetros relevantes para o cálculo da massa de água utilizada, como foi citado no capítulo anterior.

Para determinar a massa da água necessária é preciso medir a área de captação da radiação dos fornos no dia do ensaio, ao meio dia solar. Segundo [18], deve-se considerar uma massa de água de 6 l por cada metro quadrado de área de captação da radiação solar incidente. Esta área de captação é o produto entre a área projetada dos fornos, à altura do vidro da cobertura (como já tinha sido mostrado nas figuras 3.1 a 3.4) na superfície horizontal e o cosseno do ângulo de zênite, ambos medidos ao meio dia solar. No capítulo anterior explicou-se o significado desta área de captação e as suas respetivas variações no inverno e no verão. Às 9:00 solares colocam-se os fornos a aquecer sem panela e, estes, devem ser orientados a cada 15 minutos para que o pré-aquecimento seja mais eficaz. Às 11:00 solar iniciam-se os ensaios com a massa de água correspondente para cada forno. Durante o ensaio é pertinente fazer a orientação dos fornos a cada 15 minutos.



Figura 4.6 – Ensaio com a água.

4.4. Ensaio com a água e com o refletor do forno tapado

Seguindo os procedimentos de ensaios propostos em [1,2] realizaram-se ensaios para verificar o tempo que os fornos levam uma dada massa da água dos 40°C aos 80°C e dos 40°C até a ebulição. Nestes ensaios os refletores dos fornos são tapados, uma vez que a norma proposta em [2] recomenda esse procedimento. Todos os outros procedimentos de ensaios foram efetuados de forma análoga aos supracitados, na secção 4.3.



Figura 4.7 – Ensaio com a água e com os refletores dos fornos tapados.

5. Resultados: Aplicação à fornos comerciais

Os resultados que se seguem são relativamente a todos os ensaios feitos sobre os fornos SUNCOOK e SUNTASTE, descritos no capítulo 4. Todos os ensaios foram realizados com o intuito de comprovar a veracidade e a importância dos novos procedimentos propostos nesta dissertação.

5.1. Ensaio do SUNCOOK

Os primeiros ensaios realizados para o desenvolvimento e estudo dos novos coeficientes de mérito F_{1new} e F_{2new} , propostos nesta dissertação, foram feitos com o forno SUNCOOK, uma vez que, este forno já tinha sido amplamente estudado em [4]. Para o efeito, utilizaram-se dois fornos SUNCOOK, um com e o outro sem o espelho adicional na tampa (*boost*). Estes ensaios deram origem ao *paper* citado em [24].

5.1.1. Ensaio de temperatura de estagnação da placa

Com os resultados obtidos no ensaio de temperatura de estagnação da placa consegue-se saber se as temperaturas atingidas pelas placas de absorção dos fornos serão suficientes para fazer com que água atinja a ebulição e, também, permite calcular o coeficiente de mérito F_1 . As figuras que mostram a evolução da temperatura de estagnação da placa com tempo, podem ser consultadas em anexo 3. Na tabela 5.1 apresenta-se um resumo das temperaturas das placas dos fornos obtidos nos SUNCOOK's.

Tabela 5.1 - Resumo dos ensaios de estagnação da placa de absorção dos SUNCOOK's.

Temperatura de Estagnação (°C)			
Fornos	25/09/2017	23/10/2017	15/11/2017
SUNCOOK	158	146	137
SUNCOOK BOOST	171	160	148

Como se pode verificar na tabela 5.1 as temperaturas atingidas pelos fornos, quando se usam os seus respetivos refletores são suficientes para fazer com que a água atinja a ebulição, uma vez que, estas temperaturas estão muito acima da sua temperatura de ebulição.

A seguir, apresentam-se as tabelas (resumo) com os todos os valores de coeficientes de mérito F_1 e F_{1new} , calculados para o SUNCOOK e o SUNCOOK com o *boost*, relativamente aos dias da realização dos ensaios.

Tabela 5.2 - Coeficientes de mérito F_1 , relativamente aos ensaios de estagnação da placa.

F_1 ($^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$)			
Fornos	25/09/2017	23/10/2017	15/11/2017
SUNCOOK	0.161±0.005	0.181±0.005	0.210±0.005
SUNCOOK BOOST	0.177±0.005	0.203±0.005	0.231±0.005

Com os resultados apresentados na tabela 5.2, verifica-se que os valores de F_1 para o mesmo forno são muito diferentes, pelo que se torna impossível utilizar estes valores para caraterizar os fornos.

Tabela 5.3 - Coeficientes de mérito F_{1new} , relativamente aos ensaios de estagnação da placa.

F_{1new} ($^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$)			
Fornos	25/09/2017	23/10/2017	15/11/2017
SUNCOOK	0.056±0.003	0.050±0.003	0.053±0.003
SUNCOOK BOOST	0.057±0.003	0.053±0.003	0.055±0.003

Mas com os novos coeficientes, apesar de haver alguma pequena diferença entre os valores de F_{1new} medidos na tabela 5.3, verificam-se que estes valores são aceitáveis (podem considerar-se como sendo o mesmo valor), uma vez que estão dentro da margem de erro. Daí, poder afirmar-se que o novo coeficiente proposto carateriza como esperado a performance destes fornos, em contraste com o coeficiente F_1 .

5.1.2. Ensaio de temperatura de estagnação da placa com o refletor tapado

Na proposta de Mullick [1] e da norma proposta em [2], propuseram-se que se ensaiem os fornos com os refletores tapados. Fizeram-se ensaios com o SUNCOOK de acordo com esta ideia. As figuras que mostram a evolução da temperatura de estagnação da placa com o tempo, podem ser consultadas em anexo 3.

Na tabela 5.4 mostra-se o resumo dos ensaios de temperatura de estagnação da placa de absorção, de acordo com a norma indiana.

Tabela 5.4 - Resumo dos ensaios de temperatura de estagnação da placa dos SUNCOOK's, de acordo com a norma indiana.

Temperatura de Estagnação (°C)			
Fornos	02/10/2017	03/10/2017	06/11/2017
SUNCOOK	115	126	92

Os valores das temperaturas de estagnação expostas na Tabela 5.4 mostram, claramente que, quando se usam os fornos com os refletores tapados, estas temperaturas são mais baixas. Notam-se que nos vários ensaios realizados, algumas vezes, estas temperaturas podem não assegurar a ebulição da água, inclusive, houve dia (06/11/2017) em que a temperatura de estagnação da placa foi mais baixa que a sua temperatura de ebulição e, em [24], pode ver-se que não foi possível calcular o coeficiente F_2 em uma dada altura do ano. Assim, comprova-se que não faz sentido ensaiar os fornos com os refletores tapados. Estas medidas conduzem a ideia de que os coeficientes propostos por Mullick precisam de ser substituídos pelos novos coeficientes de mérito F_{1new} e F_{2new} , como já se tinha comprovado com os resultados do *paper* [24]. Desta forma, no resto da análise abordadas nesta dissertação, não se vai mais considerar o F_1 e F_2 propostos por Mullick.

5.1.3. Ensaio com a água – Comportamento térmico do forno

O ensaio com a água está relacionado com o tempo que uma dada massa da água tarda dos 40°C aos 80°C e dos 40°C até a ebulição. Com este ensaio calcula-se o coeficiente F_{2new} , que está relacionado com a quantidade de água aquecida pelos fornos e o tempo de aquecimento da água.

De acordo com as figuras 9.7, 9.8 e 9.9 (apresentadas em anexo3) verifica-se que, as temperaturas da água no SUNCOOK e SUNCOOK BOOST estão abaixo dos 40°C e, por vezes, ligeiramente acima dos 40°C. Devido aos problemas experimentais é muito difícil começar com a água, exatamente, a 40°C, desta forma, começa-se com a água a uma temperatura ligeiramente mais baixa. Com esta escolha de temperaturas iniciais, quantifica-se com mais precisão o tempo que a água tarda dos 40°C até aos 80°C e dos

40°C até a ebulição. Na tabela 5.5, apresenta-se as massas de água utilizadas no SUNCOOK e no SUNCOOK com o *boost*.

Tabela 5.5 - Massas de água utilizadas no SUNCOOK e no SUNCOOK com o boost.

Massa de água (kg)			
Fornos	16/11/2017	17/11/2017	20/11/2017
SUNCOOK	1.699	1.699	1.686
SUNCOOK BOOST	1.884	1.880	1.872

Como já se tinha citado, anteriormente, a massa de água depende da área de captação da radiação incidente (A_n). Com estes valores pode-se verificar que a massa de água varia com a variação sazonal da altura do sol. Esta variação faz com que o A_n seja diferente e quanto maior for o valor desta área maior será a massa de água utilizada. Os valores de A_n foram os seguintes:

Tabela 5.6 - Área de captação da radiação solar incidente (A_n), dos SUNCOOK's, para os dias indicados.

A_n (m ²)			
Fornos	16/11/2017	17/11/2017	20/11/2017
SUNCOOK	0.283	0.283	0.281
SUNCOOK BOOST	0.314	0.313	0.312

De seguida apresenta-se uma tabela resumo, com o tempo que a água tardou em aquecer dos 40°C aos 80°C (τ) e dos 40°C até a estagnação (τ_1).

Tabela 5.7 - Tempos τ e τ_1 dos ensaios com a água, relativamente aos SUNCOOK's, para os dias indicados.

Fornos	16/11/2017		17/11/2017		20/11/2017	
	τ (min)	τ_1 (min)	τ (min)	τ_1 (min)	τ (min)	τ_1 (min)
SUNCOOK	75	138	77	152	72	146
SUNCOOK BOOST	66	116	71	126	64	117

Através dos resultados obtidos na tabela 5.7 para os fornos SUNCOOK e SUNCOOK com o *boost*, verifica-se que os tempos τ e τ_1 são mais curtos do que τ e τ_1 para os outros fornos solares de tipo caixa existentes, apesar de, a massa de água ser superior a 1,5 kg. Este facto mostra o que já sabíamos, estes fornos estão entre os mais eficientes do mundo.

Na tabela 5.8 mostra-se a tabela (resumo) com todos os valores do coeficiente F_{2new} .

Tabela 5.8 - Coeficiente F_{2new} , relativamente aos ensaios da água, com os SUNCOOK's.

F_{2new}			
Fornos	16/11/2017	17/11/2017	20/11/2017
SUNCOOK	0.372±0.032	0.355±0.032	0.400±0.032
SUNCOOK BOOST	0.391±0.032	0.354±0.032	0.396±0.032

Estes são os valores do coeficiente de mérito F_{2new} para serem usados na época em que os ensaios foram realizados. As diferenças apresentadas entre estes valores estão dentro da margem de erro. Contudo ainda não são tão coincidentes quanto poderíamos esperar, pelo que pensamos que outros parâmetros que influenciam o comportamento dos fornos e que não foram considerados, deverão sê-lo no futuro, para se obterem resultados com maior fiabilidade na caracterização do forno. Estes parâmetros podem estar relacionados com a velocidade do vento no dia de teste e, que por sua vez, tem uma influência na condensação da água no vidro da cobertura do forno, influenciando o valor das perdas térmicas e o dos ganhos solares.

Para além das temperaturas τ e τ_1 , pode-se calcular outra medida muito importante dos fornos que é o tempo que a água tarda em aquecer da temperatura ambiente até a ebulição (τ_{0new}), definida em [24].

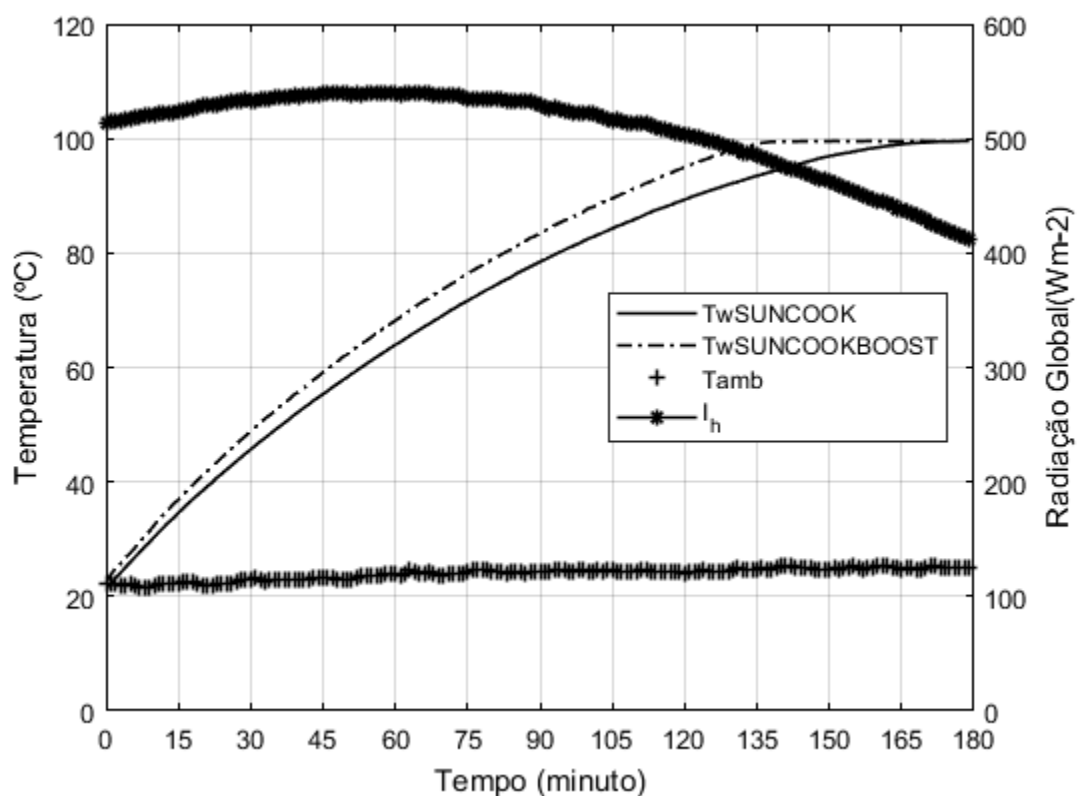


Figura 5.1 - Evolução da temperatura da água com o tempo (da temperatura ambiente até a ebulição, 20/11/2017) nos SUNCOOK's.

Na Tabela 5.9 apresenta-se o tempo que a água tarda em aquecer da temperatura ambiente até a ebulição. Os tempos exibidos correspondem aos medidos na figura 5.1 ($\tau_{0\text{medido}}$) e a nova fórmula ($\tau_{0\text{new}}$) proposta no *paper* [24].

Tabela 5.9 - Temperaturas $\tau_{0\text{medido}}$ e $\tau_{0\text{new}}$ para o ensaio da água com os SUNCOOK's.

20/11/2017		
Fornos	$\tau_{0\text{medido}}(\text{min})$	$\tau_{0\text{new}}(\text{min})$
SUNCOOK	168	158
SUNCOOK_BOOST	136	133

Os valores de $\tau_{0\text{new}}$, mostrados na tabela 5.9, não estão muito distantes dos valores de $\tau_{0\text{medido}}$. Estas diferenças são, provavelmente, resultantes da diferença entre a temperatura da água e a temperatura ambiente, no início do ensaio. Apesar das pequenas diferenças entre os valores de $\tau_{0\text{medido}}$ e $\tau_{0\text{new}}$, o novo parâmetro ($\tau_{0\text{new}}$) será mais uma ferramenta pertinente na análise da performance dos fornos solares de tipo caixa. Através destes ensaios experimentais provou-se que os novos coeficientes propostos definem melhor os

fornos solares de tipo caixa e explicam melhor o conceito da variação da área de captação da radiação solar incidente com a variação sazonal da altura do sol. Foi mencionado no *paper* [24] que é importante abordar a questão da utilidade destes coeficientes em outras alturas do ano e conjecturou-se se poderiam ser utilizados, em qualquer estação do ano. No entanto, esta questão não foi abordada no *paper* [24]. Isso será feito na secção seguinte, 5.3.

5.2. Ensaio dos fornos SUNTASTE

À semelhança dos ensaios realizados com os fornos SUNCOOK, a pedido da Empresa SUN OK, fizeram-se ensaios com os novos fornos de cortiça, SUNTASTE (COMPACT e LARGE), a fim de caracterizá-los. Para a caracterização dos supracitados fornos usaram-se apenas os novos coeficientes de mérito F_{1new} , F_{2new} e o tempo τ_{0new} . Estes ensaios deram origem ao *paper* citado em [23]. Pode considerar-se que estes ensaios, solicitados pela SUN OK, são uma primeira aplicação dos resultados e conclusões tiradas em 5.1.

5.2.1. Ensaio de temperatura de estagnação da placa

Com os resultados obtidos no ensaio de temperatura de estagnação da placa consegue-se saber se as temperaturas atingidas pelas placas de absorção dos fornos serão suficientes para fazer com que a água atinja a ebulição e, também, permite calcular o coeficiente de mérito F_{1new} . As figuras que mostram a evolução da temperatura de estagnação da placa com tempo, podem ser consultadas em anexo 4. Na tabela 5.10 apresenta-se um resumo das temperaturas das placas dos fornos para cada ensaio realizado com o SUNTASTE (COMPACT e LARGE).

Tabela 5.10 - Resumo dos ensaios de temperatura de estagnação da placa dos SUNTASTE's.

Temperatura de Estagnação (°C)			
Fornos	25/09/2017	23/10/2017	15/11/2017
SUNTASTE COMPACT	156	146	131
SUNTASTE LARGE	159	152	137

Como se pode verificar na tabela 5.10 as temperaturas atingidas pelos fornos SUNTASTE (COMPACT e LARGE), estão muito acima da temperatura de ebulição da água. A seguir, apresentar-se-á as tabelas (resumo) com os todos os valores de coeficientes de mérito F_{1new} , calculados para o SUNTASTE (COMPACT e LARGE), relativamente aos dias da realização dos ensaios.

Tabela 5.11 - Coeficientes de mérito F_{1new} , relativamente aos ensaios de estagnação da placa dos SUNTASTE's.

F_{1new} ($^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$)			
Fornos	25/09/2017	23/10/2017	15/11/2017
SUNTASTE COMPACT	0.051±0.003	0.046±0.003	0.047±0.003
SUNTASTE LARGE	0.056±0.003	0.052±0.003	0.052±0.003

Com os valores medidos na tabela 5.11 as conclusões são as mesmas obtidas para o SUNCOOK.

5.2.2. Ensaio com a água – Comportamento térmico do forno

Estes ensaios seguem os procedimentos usados, anteriormente, em 5.1.3. As figuras que ilustram a evolução da temperatura da água dos 40°C até a ebulição, estão apresentadas em anexo 4. Com este ensaio permite calcular o coeficiente de mérito F_{2new} .

Os valores de A_n para os supracitados ensaios, foram os seguintes:

Tabela 5.12 - Área de captação da radiação solar incidente (A_n), dos SUNTASTE's.

A_n (m^2)			
Fornos	16/11/2017	17/11/2017	20/11/2017
SUNTASTE COMPACT	0.227	0.220	0.219
SUNTASTE LARGE	0.289	0.288	0.287

Na tabela 5.13, apresenta-se as massas de água utilizadas no SUNTASTE (COMPACT e LARGE).

Tabela 5.13 - Massas de água utilizadas no SUNTASTE (COMPACT e LARGE).

Massa de água (kg)			
Fornos	16/11/2017	17/11/2017	20/11/2017
SUNTASTE COMPACT	1.359	1.323	1.315
SUNTASTE LARGE	1.732	1.728	1.718

De seguida apresenta-se uma tabela resumo, com o tempo que a água levou dos 40°C aos 80°C (τ) e dos 40°C até a estagnação (τ_1).

Tabela 5.14 - Tempos τ e τ_1 medidos, utilizando os fornos SUNTASTE's.

Fornos	16/11/2017		17/11/2017		20/11/2017	
	τ (min)	τ_1 (min)	τ (min)	τ_1 (min)	τ (min)	τ_1 (min)
SUNTASTE COMPACT	73	144	70	148	62	132
SUNTASTE LARGE	78	144	77	154	73	157

Na tabela 5.15 mostra-se todos os valores do coeficiente F_{2new} , dos ensaios com a água, utilizando o SUNTASTE (COMPACT e LARGE).

Tabela 5.15 - Coeficiente F_{2new} medidos, utilizando os fornos SUNTASTE's.

F_{2new}			
Fornos	16/11/2017	17/11/2017	20/11/2017
SUNTASTE COMPACT	0.384±0.032	0.387±0.032	0.434±0.032
SUNTASTE LARGE	0.372±0.032	0.369±0.032	0.391±0.032

Constata-se que os coeficientes F_{1new} e F_{2new} podem ser medidos, também, nos fornos solares de tipo caixa com geometrias diferentes. Quanto aos valores de F_{2new} medidos, as conclusões são as mesmas tiradas para o SUNCOOK.

Seguidamente, procede-se para o cálculo de τ_{0new} . Na figura 5.2 mostra-se a evolução da temperatura da água com o tempo (da temperatura ambiente até a ebulição) no SUNTASTE (COMPACT e LARGE) e na tabela 5.16 faz-se uma análise comparativa entre este tempo medido na figura ($\tau_{0medido}$) e o τ_{0new} calculado.

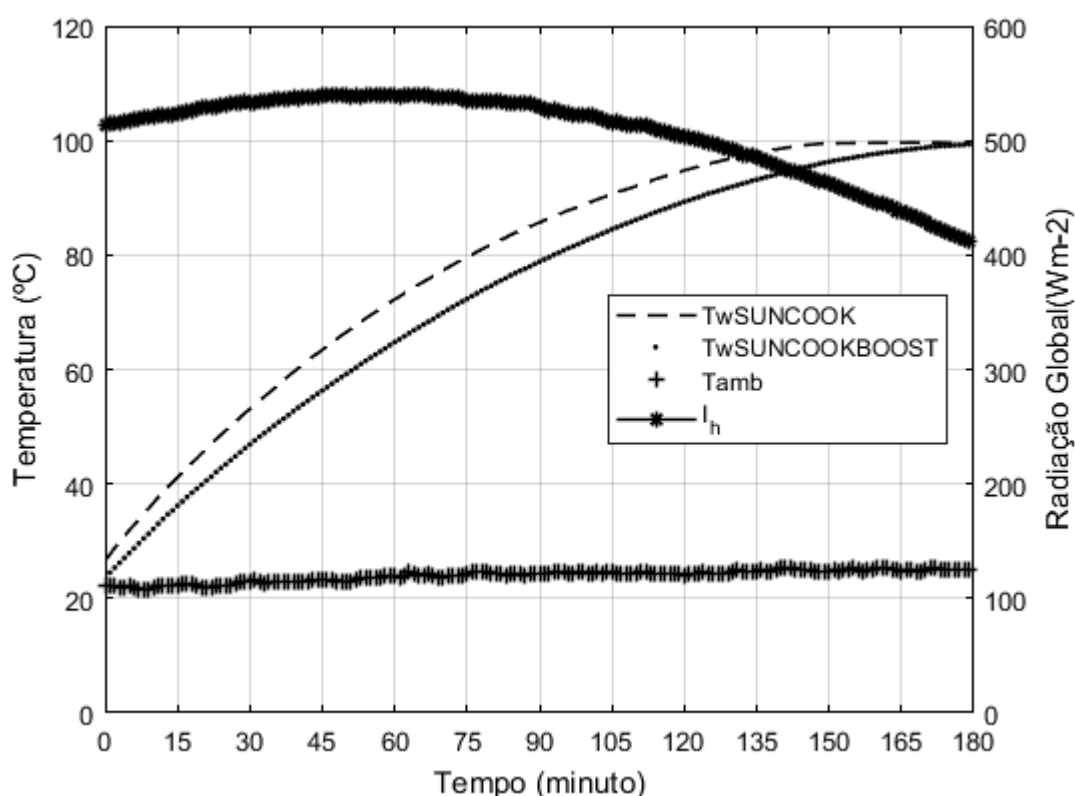


Figura 5.2 - Evolução da temperatura da água com o tempo (da temperatura ambiente até à ebulição, 20/11/2017) nos SUNTASTE's.

Tabela 5.16 - Temperaturas $\tau_{0medido}$ e τ_{0new} para o ensaio da água com os SUNTASTE's.

20/11/2017		
Fornos	$\tau_{0medido}$ (min)	τ_{0new} (min)
SUNCOOK	145	134
SUNCOOK_BOOST	177	165

Os valores de τ_{0new} , mostrados na tabela 5.16, não estão muito distantes dos valores de $\tau_{0medido}$. Assim, mostra-se que o novo parâmetro (τ_{0new}) pode ser usado em fornos solares de tipo caixa com geometrias diferentes, para o dia indicado. No entanto, será preciso

provar se este parâmetro (τ_{0new}) pode ser usado em outras alturas do ano. Na secção 5.3, irá se fazer o estudo da sazonalidade, com o intuito de conhecer esta incógnita.

5.3. Estudo da sazonalidade dos coeficientes medidos e resultados obtidos

No paper [24] conjecturou-se se os coeficientes de mérito obtidos numa determinada época, poderiam ser usados em épocas do ano diferentes. Os resultados obtidos em [4], mediram os coeficientes de mérito em Maio. Portanto, nesta secção pretende-se fazer o estudo da sazonalidade, ou seja, comprovar se os coeficientes de mérito F_{1new} e F_{2new} serão muito diferentes ou idênticos se forem medidos em outras alturas do ano. Repetiu-se os ensaios de temperatura de estagnação da placa e ensaios com a água em época do ano diferente (verão). Para os devidos efeitos utilizaram-se todos os fornos disponíveis.

5.3.1. Ensaio de estagnação da placa

Neste ensaio repetiu-se os procedimentos já abordados nesta dissertação sobre o supracitado ensaio. As figuras que ilustram os ensaios de temperatura de estagnação da placa, realizados no verão, podem ser consultadas em anexo 5.

Na tabela seguinte mostra-se os valores das temperaturas de estagnação obtidas nos ensaios realizados em épocas do ano diferentes, relativamente aos fornos SUNCOOK's e SUNTASTE's.

Tabela 5.17 – Resumo dos ensaios de temperatura de estagnação da placa, com os 4 fornos.

Temperatura de Estagnação (°C)					
Fornos	25/09/2017	23/10/2017	15/11/2017	09/07/2018	25/07/2018
SUNCOOK	158	146	137	167	168
SUNCOOK BOOST	171	160	148	181	176
SUNTASTE COMPACT	156	146	131	157	151
SUNTASTE LARGE	159	152	137	161	160

Como se pode verificar na tabela 5.17, todas as temperaturas de estagnação da placa atingidas são superiores à temperatura de ebulição da água.

A seguir, apresentar-se a tabela (resumo) com todos os valores de coeficiente de mérito F_{1new} , calculados para os quatro fornos, relativamente aos dias da realização dos ensaios.

Tabela 5.18 – Coeficiente de mérito F_{1new} dos quatro fornos ensaiados.

F_{1new} ($^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$)					
Fornos	25/09/2017	23/10/2017	15/11/2017	09/07/2018	25/07/2018
SUNCOOK	0.056±0.003	0.050±0.003	0.053±0.003	0.056±0.003	0.059±0.003
SUNCOOK BOOST	0.057±0.003	0.053±0.003	0.055±0.003	0.057±0.003	0.057±0.003
SUNTASTE COMPACT	0.051±0.003	0.046±0.003	0.047±0.003	0.059±0.003	0.060±0.003
SUNTASTE LARGE	0.056±0.003	0.052±0.003	0.052±0.003	0.054±0.003	0.057±0.003

Na tabela 5.18, verifica-se que mesmo que os ensaios sejam realizados em épocas do ano distintas, o novo coeficiente proposto, F_{1new} , apresenta valores próximos. Estas diferenças são derivadas dos valores diferentes de A_n , que faz com que o F_{1new} seja diferente. Contudo, as diferenças dos restantes meses indicados na tabela 4.18 e os meses de verão estão na ordem dos 8%, 3%, 19% e 4%, para o SUNCOOK, SUNCOOK com o *boost*, SUNTASTE COMPACT e SUNTASTE LARGE, respetivamente. Esta proximidade explica a importância deste coeficiente que faz uma abordagem que inclui a área de captação da radiação incidente. Os valores obtidos confirmam que F_{1new} consegue razoavelmente refletir o comportamento dos fornos, independentemente, da sua geometria e da variação sazonal da altura do sol.

5.3.2. Ensaio com a água – Comportamento térmico do forno

Com este ensaio pretende-se calcular o F_{2new} e ver se este coeficiente medido em dada altura pode ser usado em outras épocas do ano. As figuras que ilustram a evolução da temperatura da água dos 40°C até a ebulição, estão apresentadas em anexo 5. Na tabela

5.19, apresenta-se o valor de A_n , para os quatro fornos, relativamente aos ensaios realizados em épocas de ano diferentes.

Tabela 5.19 - Área de captação da radiação solar incidente (A_n), dos quatro fornos.

A_n (m ²)					
Fornos	16/11/2017	17/11/2017	20/11/2017	11/07/2018	13/07/2018
SUNCOOK	0.283	0.283	0.281	0.332	0.332
SUNCOOK BOOST	0.314	0.313	0.312	0.362	0.362
SUNTASTE COMPACT	0.227	0.220	0.219	0.261	0.261
SUNTASTE LARGE	0.289	0.288	0.287	0.341	0.341

Na tabela 5.20, apresenta-se as massas de água utilizadas nos quatro fornos.

Tabela 5.20 - Massas de água utilizadas nos quatro fornos.

Massa de água (kg)					
Fornos	16/11/2017	17/11/2017	20/11/2017	11/07/2018	13/07/2018
SUNCOOK	1.699	1.699	1.686	1.993	1.993
SUNCOOK BOOST	1.884	1.880	1.872	2.171	2.171
SUNTASTE COMPACT	1.359	1.323	1.315	1.567	1.567
SUNTASTE LARGE	1.732	1.728	1.718	2.047	2.047

Analisando os resultados das tabelas 5.19 e 5.20, verifica-se que a massa de água varia com a variação sazonal da altura do sol. Como variam em conjunto, A_n e $(MC)_w$ em proporcionalidade direta, não se espera que haja uma grande diferença no valor do coeficiente F_{2new} , medidos em alturas diferentes do ano. De seguida apresenta-se uma

tabela resumo, com o tempo que a água levou dos 40°C aos 80°C (τ) e dos 40°C até a estagnação (τ_1).

Tabela 5.21 – Tempos τ e τ_1 , obtidos nos quatro fornos, no ensaio com a água.

	16/11/2017		17/11/2017		20/11/2017		11/07/2018		13/07/2018	
Fornos	τ (min)	τ_1 (min)	τ (min)	τ_1 (min)	τ (min)	τ_1 (min)	τ (min)	τ_1 (min)	τ (min)	τ_1 (min)
SUNCOOK	75	138	77	152	72	146	52	93	49	86
SUNCOOK BOOST	66	116	71	126	64	117	57	97	52	89
SUNTASTE COMPACT	73	144	70	148	62	132	67	116	64	116
SUNTASTE LARGE	78	144	77	154	73	157	62	116	62	115

Analisando os resultados da tabela 5.21, todos os valores de τ e τ_1 obtidos são aceitáveis e, estes tempos, são até muito curtos comparado aos outros fornos solares de tipo caixa existentes.

Tabela 5.22 - Coeficiente F_{2new} , relativamente aos ensaios com a água, com os quatro fornos.

	F_{2new} (-)				
Fornos	16/11/2017	17/11/2017	20/11/2017	11/07/2018	13/07/2018
SUNCOOK	0.372±0.032	0.355±0.032	0.400±0.032	0.430±0.032	0.452±0.032
SUNCOOK BOOST	0.391±0.032	0.354±0.032	0.396±0.032	0.382±0.032	0.408±0.032
SUNTASTE COMPACT	0.384±0.032	0.387±0.032	0.434±0.032	0.325±0.032	0.331±0.032
SUNTASTE LARGE	0.372±0.032	0.369±0.032	0.391±0.032	0.370±0.032	0.360±0.032

Os valores de $F_{2\text{new}}$, na tabela 5.22, mostram-se que o novo coeficiente de mérito se aproxima da ideia de poder ser medido, independentemente, da geometria dos fornos solares de tipo caixa. Contudo procuraremos voltar a este assunto afinando as condições de ensaio para contemplar variações como a da velocidade do vento, por forma a aumentar a confiança nos resultados obtidos. Os valores de $F_{2\text{new}}$ medidos em novembro são diferentes dos valores medidos em julho. A diferença entre os valores medidos em novembro e os valores medidos em julho estão na ordem dos 15%, 4%, 33% e 29%, para o SUNCOOK, SUNCOOK com o *boost*, SUNTASTE COMPACT e SUNTASTE LARGE, respetivamente. Estas diferenças estão diretamente relacionadas com o tempo que a água tarda dos 40°C à 80°C, com a temperatura ambiente média durante o ensaio e com a radiação global média na superfície horizontal durante o ensaio, no período em que os fornos são ensaiados. Conclui-se que, os novos coeficientes de mérito $F_{1\text{new}}$ e $F_{2\text{new}}$ estão, evidentemente, adequados para serem incluídos numa futura norma de ensaio, mas não ficou ainda completamente resolvida a questão da independência destes coeficientes com a sazonalidade.

Seguidamente, procede-se para o cálculo de $\tau_{0\text{new}}$. Nas figuras 5.3 e 5.4 mostram-se a evolução da temperatura da água com o tempo (da temperatura ambiente até à ebulição) nos quatro fornos e na tabela 5.23 faz-se uma análise comparativa entre este tempo medido na figura (τ_{medido}) e o $\tau_{0\text{new}}$ calculado.

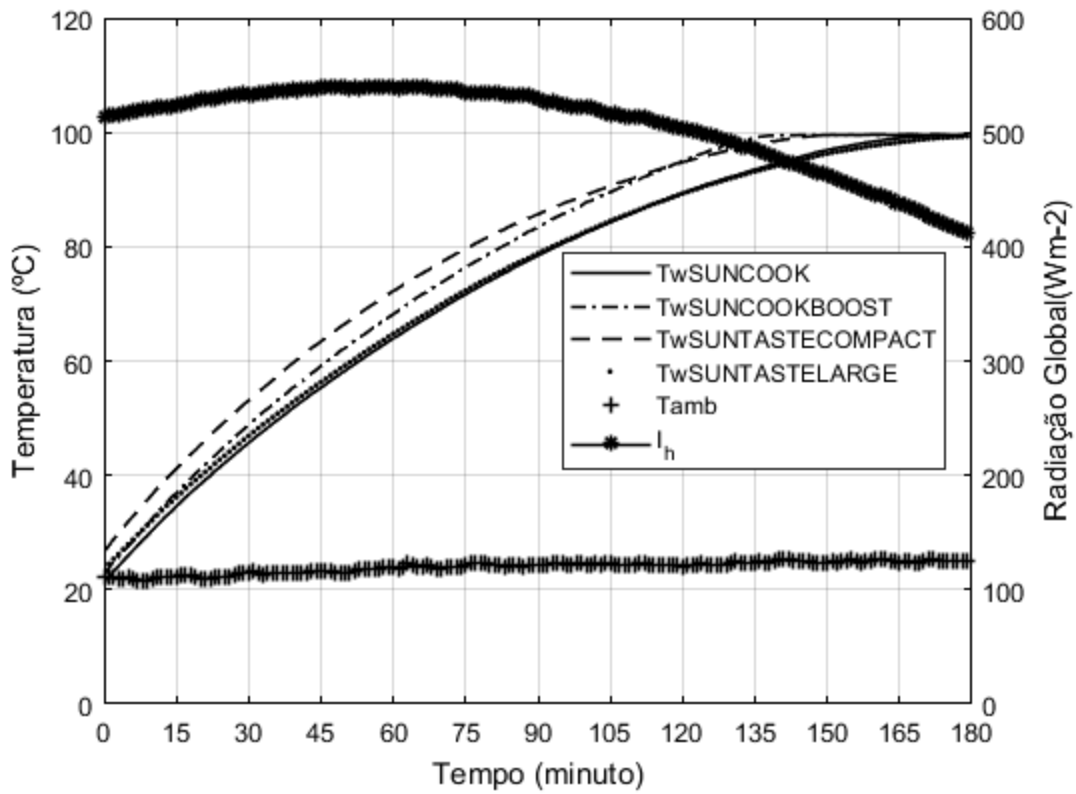


Figura 5.3 - Evolução da temperatura da água com o tempo (da temperatura ambiente até à ebulição, 20/11/2017) nos quatro fornos.

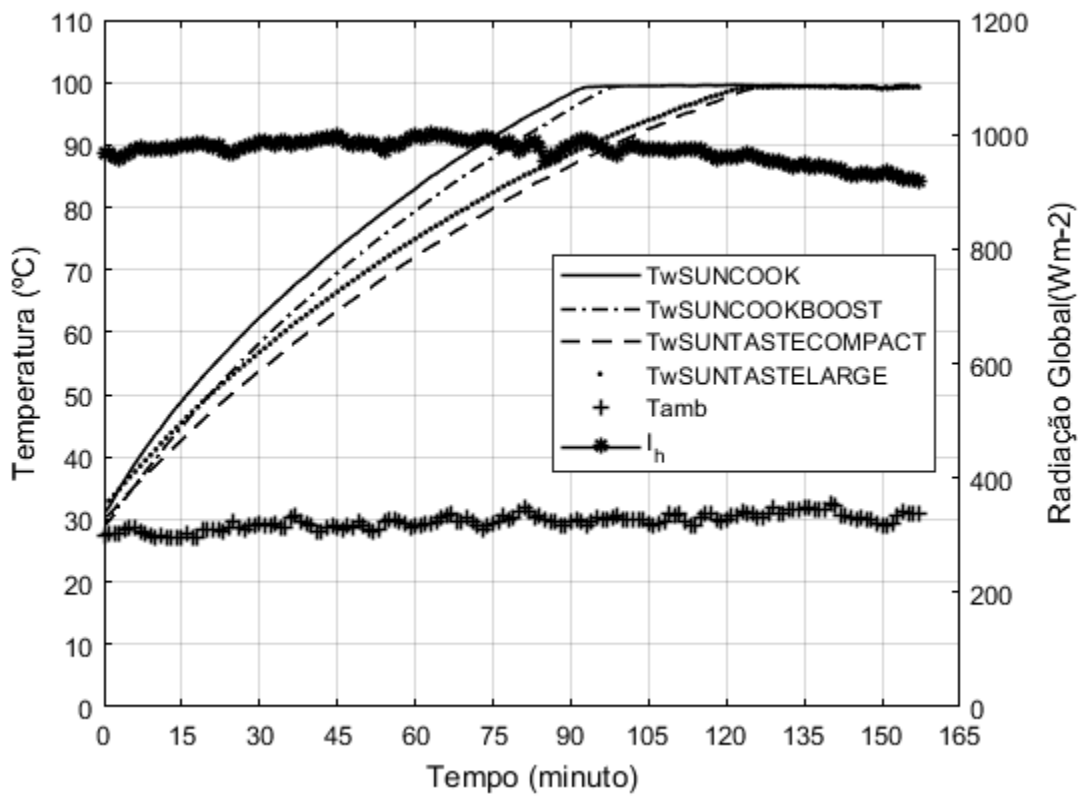


Figura 5.4 - Evolução da temperatura da água com o tempo (da temperatura ambiente até à ebulição, 13/07/2018) nos quatro fornos.

Tabela 5.23 - Temperaturas $\tau_{0\text{medido}}$ e $\tau_{0\text{new}}$ para o ensaio da água com os quatro fornos.

Fornos	20/11/2017		13/07/2018	
	$\tau_{0\text{medido}}(\text{min})$	$\tau_{0\text{new}}(\text{min})$	$\tau_{0\text{medido}}(\text{min})$	$\tau_{0\text{new}}(\text{min})$
SUNCOOK	168	158	93	94
SUNCOOK_BOOST	136	133	98	99
SUNTASTE COMPACT	145	134	128	122
SUNTASTE LARGE	177	165	124	121

Os valores de $\tau_{0\text{new}}$ calculados, mostrados na tabela 5.23, reproduzem bem os valores de $\tau_{0\text{medido}}$. Apesar das pequenas diferenças entre os valores de $\tau_{0\text{medido}}$ e $\tau_{0\text{new}}$, comprova-se, mais uma vez que, o novo parâmetro ($\tau_{0\text{new}}$) pode ser usado em fornos solares de tipo caixa, com diferentes tipos de geometria. Quanto a questão da independência da época do ano em que os fornos são ensaiados, a conclusão é semelhante à que indicamos antes para $F_{1\text{new}}$ e $F_{2\text{new}}$ anterior. Assim, o $\tau_{0\text{new}}$ pode constituir a nossa proposta para inclusão numa futura norma de ensaio.

6. Caraterização dos fornos pela potência

Neste capítulo apresenta-se o estudo de um novo parâmetro que é a potência de cozedura dos fornos. Os ensaios foram feitos com os mesmos fornos usados anteriormente.

Como se disse, segundo Funk, a figura que melhor representa o desempenho térmico do forno é a potência de cozedura efetiva. Infra, fala-se detalhadamente de como se obtém esta figura de desempenho do forno retratada em [5], também que é abordada na norma proposta pela ASABE [16].

A potência é a razão entre a quantidade de calor e um certo intervalo de tempo. Considerando a variação da temperatura da água em cada 10 minutos, a potência do forno em *Watt*, é dada pela seguinte fórmula [5,16]:

$$P_i = \frac{(T_2 - T_1) \times (MC)_w}{600} \quad (6.1)$$

Onde:

P_i é a potência de cozedura para o intervalo de tempo i , T_2 a temperatura final da água e T_1 a temperatura inicial da água.

Segundo Funk [5], 10 minutos é o tempo suficiente para que as pequenas flutuações das perdas de calor, devido à temperatura ambiente e à variabilidade do vento, sejam negligenciáveis. Também este tempo é muito curto para que as pequenas flutuações na variabilidade do ganho de calor, devido a mudanças graduais no ângulo do sol, possam ser consideradas constantes durante o intervalo.

A potência de cozedura supracitada pode ser padronizada efetuando a multiplicação da referida potência por uma radiação standard de 700 W/m^2 e dividindo pela radiação média no intervalo de tempo i [5,16]. O valor da radiação standard é utilizada como uma forma de padronizar a potência de cozedura, uma vez que o forno pode ser ensaiado em lugares diferentes e, assim, permite a comparação de resultados [5].

$$P_s = P_i \times \left(\frac{700}{I_{hi}} \right) \quad (6.2)$$

Com os valores de P_s para cada intervalo i , é possível obter um gráfico que relaciona a potência de cozedura padronizada e uma diferença de temperatura ΔT [16], em que

$$\Delta T = T_w - T_a \quad (6.3)$$

Onde:

T_w é a temperatura da água e T_a a temperatura ambiente.

Para cada intervalo i , deve calcular-se a temperatura média da água e a temperatura ambiente média.

Desta forma, pode-se utilizar a regressão linear para determinar a relação entre a potência de cozedura padronizada e a diferença de temperatura descrita supra. A referida relação é mostrada na seguinte equação [5,16].

$$P_s = a + b \times \Delta T \quad (6.4)$$

Em que:

a é a interceção da reta com o eixo vertical e b o declive da reta.

A potência de cozedura padronizada pode ser calculada para um ΔT convencional e igual a 50°C e este valor pode ser referenciado como uma medida simples de desempenho. Este ΔT é um valor médio que quantifica um equilíbrio entre uma sobrecarga de potência de cozedura inicial nos fornos de concentração e a temperatura de estagnação nos fornos solares de tipo caixa, assim, facilita a comparação entre diferentes tipos de forno. Este ΔT está abaixo da temperatura crítica da qual a cozedura começa a ocorrer, ou seja, a partir desta temperatura ter-se-á a perceção se o forno solar funciona bem ou não [5,18].

Tendo em consideração as definições de potência definidas em [5,16], procedeu-se aos cálculos da mesma, com os resultados dos ensaios com a água, dos quatro fornos.

Em [16] recomendam que para fazer o cálculo da potência, deve considerar-se temperaturas da água 5°C superior a temperatura ambiente e 5°C abaixo da ebulição, e assim se fez.

Os ensaios apresentados nas figuras seguintes, correspondem aos dias 20/11/2017 e 13/07/2018.

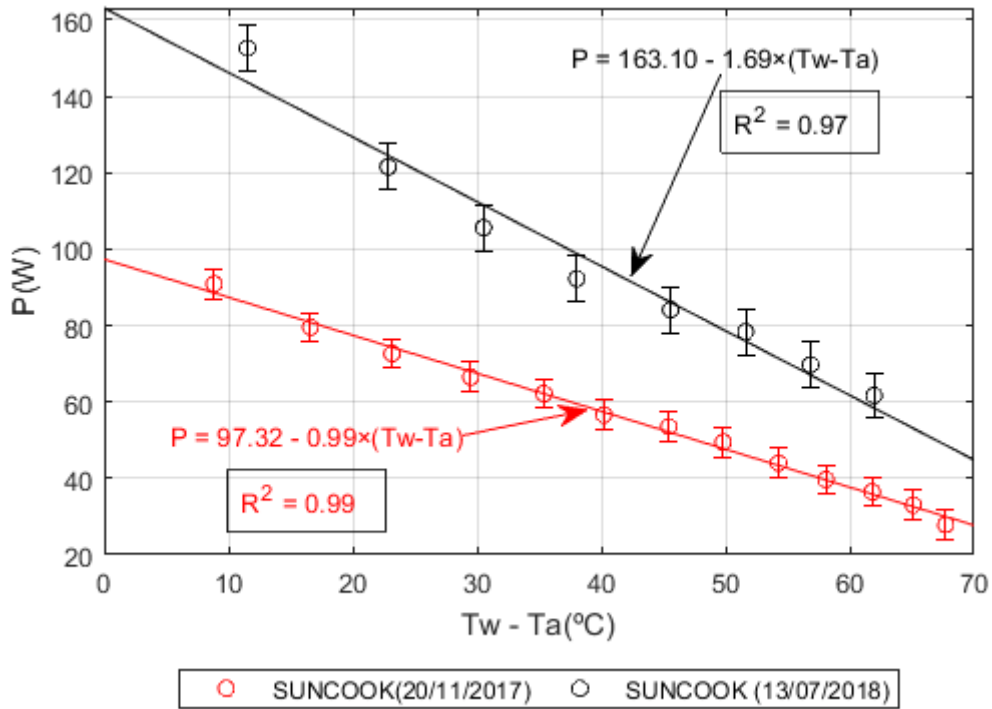


Figura 6.1 - Potência de cozedura do SUNCOOK.

De acordo com as equações das potências de cozedura mostradas na figura 6.1, para um ΔT ($T_w - T_a$) igual a 50°C , obteve-se uma potência de $48 \pm 17\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 97.32 ± 2.22 e **b** igual a -0.99 ± 0.05 , para o dia 20/11/2017 e $79 \pm 20\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 163.10 ± 13.00 e **b** igual a -1.69 ± 0.30 , para o dia 13/07/2018, no SUNCOOK.

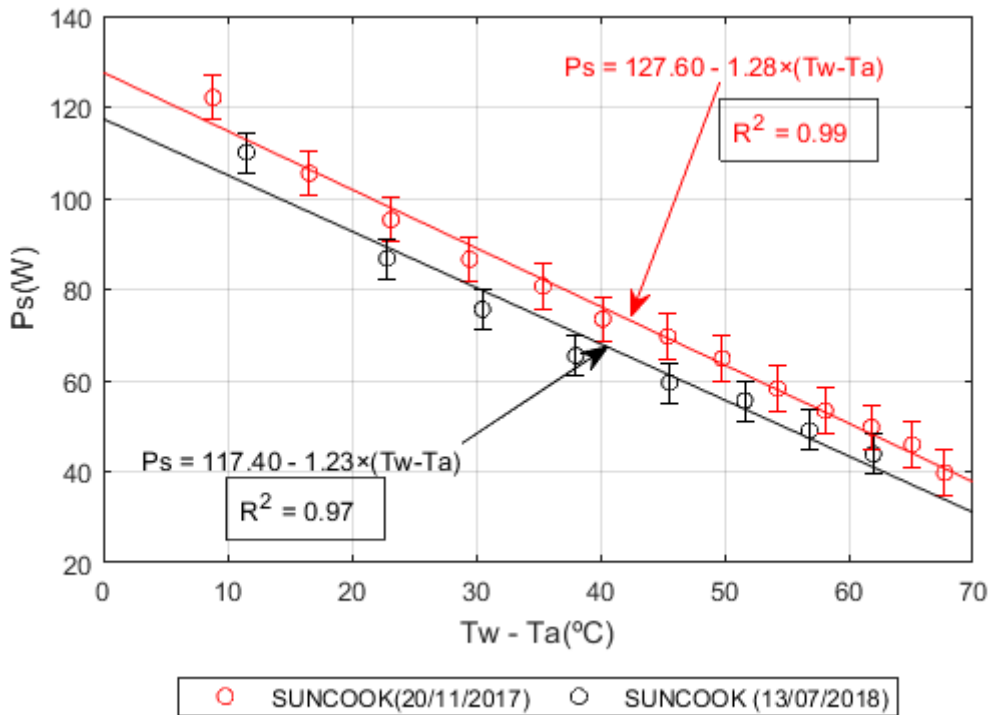


Figura 6.2 - Potência de cozedura padronizada do SUNCOOK.

De acordo com as equações das potências de cozedura padronizada mostradas na figura 6.2, para um ΔT ($T_w - T_a$) igual a 50°C , obteve-se uma potência de $64 \pm 17\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 127.60 ± 3.80 e **b** igual a -1.28 ± 0.08 , para o dia 20/11/2017 e $56 \pm 20\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 117.40 ± 9.90 e **b** igual a -1.23 ± 0.23 para o dia 13/07/2018, no SUNCOOK.

Analisando as figuras 6.1 e 6.2, nota-se que quando se calcula a potência de cozedura padronizada, para um ΔT ($T_w - T_a$) igual a 50°C , esta é maior em Novembro do que em Julho. Uma vez que, em Julho a radiação solar global na superfície horizontal é maior do que em Novembro, a correção da padronização acaba por ter maior impacto.

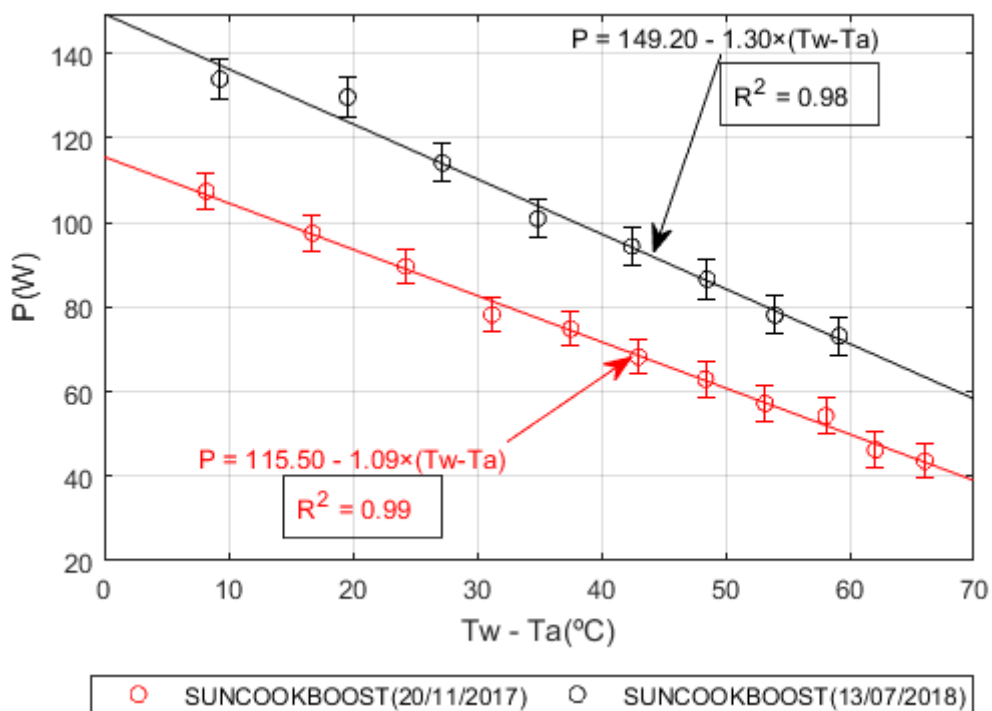


Figura 6.3 - Potência de cozedura do SUNCOOK com o boost.

De acordo com as equações das potências de cozedura mostradas na figura 6.3, para um ΔT ($T_w - T_a$) igual a 50°C , obteve-se uma potência de $61 \pm 17\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 115.50 ± 2.40 e **b** igual a -1.09 ± 0.06 , para o dia 20/11/2017 e $84 \pm 20\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 149.20 ± 6.50 e **b** igual a -1.30 ± 0.16 , para o dia 13/07/2018, no SUNCOOK com o *boost*.

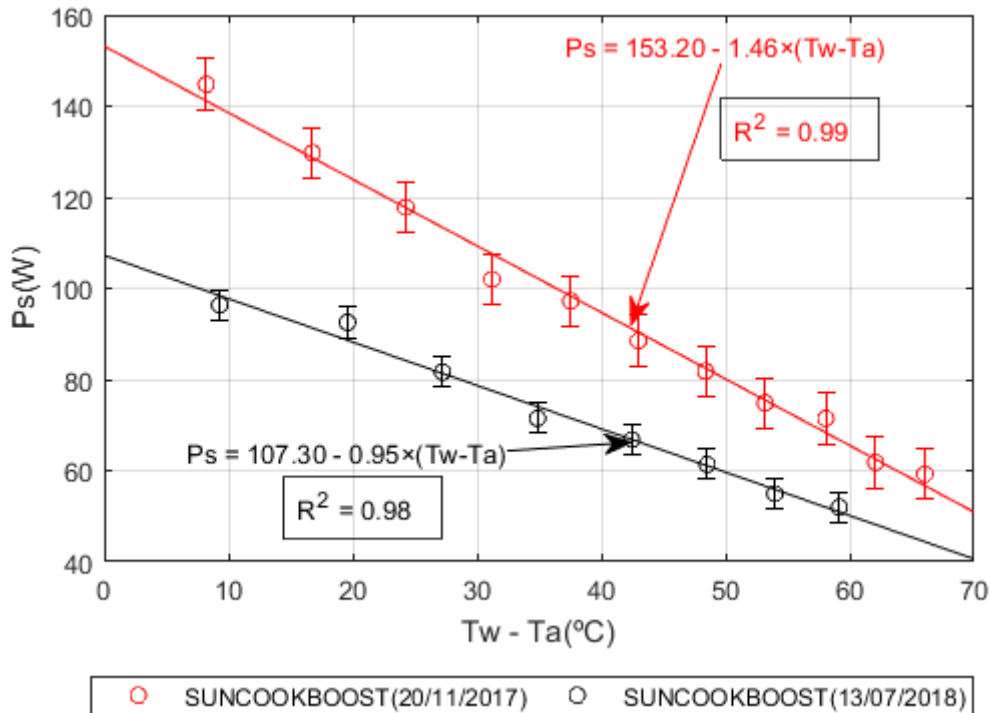


Figura 6.4 - Potência de cozadura padronizada do SUNCOOK com o boost.

De acordo com as equações das potências de cozadura padronizada mostradas na figura 6.4, para um ΔT ($T_w - T_a$) igual a 50°C , obteve-se uma potência de $80 \pm 18\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 153.20 ± 4.60 e **b** igual a -1.46 ± 0.10 , para o dia 20/11/2017 e $60 \pm 21\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 107.30 ± 4.70 e **b** igual a -0.95 ± 0.12 para o dia 13/07/2018, no SUNCOOK com o *boost*. No paper [4], fez-se uma caracterização do forno SUNCOOK com o *boost*, pela potência e obteve-se uma potência de cozadura padronizada igual a $67 \pm 3\text{W}$, para o ensaio realizado em Maio. O valor da potência de cozadura obtida em Julho, para o SUNCOOK com o *boost*, está próximo do valor obtido em Maio. Esta diferença de 7W está relacionada com o valor da radiação solar global na superfície horizontal, que em Julho é maior do que em Maio e ao padronizar a potência será menor em Julho.

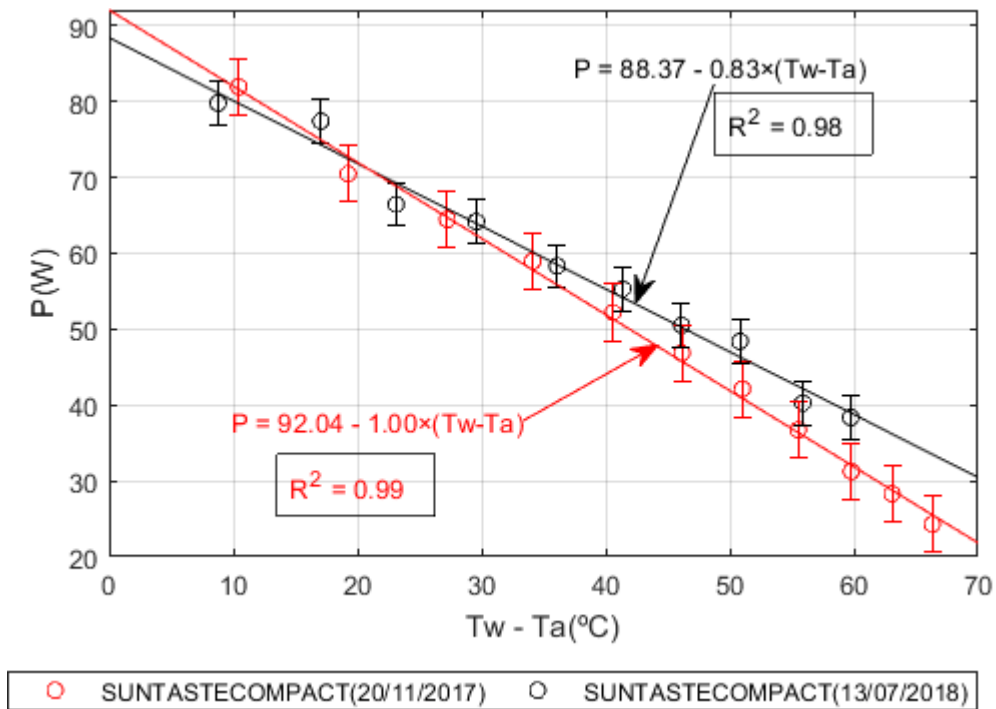


Figura 6.5 - Potência de cozedura do SUNTASTE COMPACT.

De acordo com as equações das potências de cozedura mostradas na figura 6.5, para um ΔT ($T_w - T_a$) igual a 50°C , obteve-se uma potência de $42 \pm 13\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 99.04 ± 2.16 e **b** igual a -1.00 ± 0.05 , para o dia 20/11/2017 e $47 \pm 15\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 88.37 ± 3.46 e **b** igual a -0.83 ± 0.08 , para o dia 13/07/2018, no SUNTASTE COMPACT.

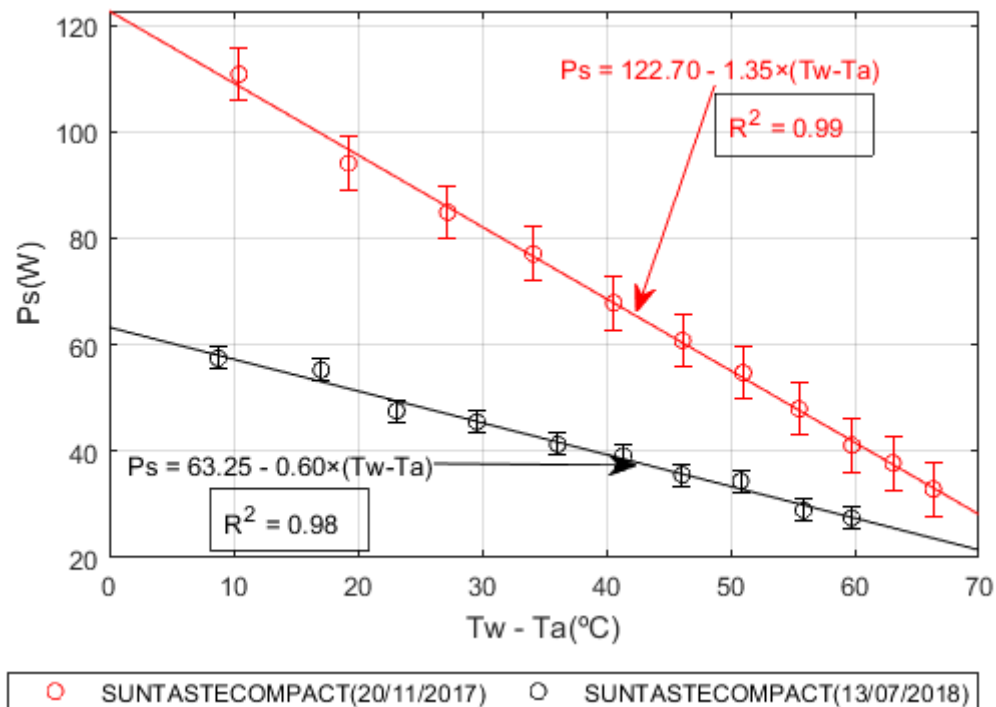


Figura 6.6 - Potência de cozedura padronizada do SUNTASTE COMPACT.

De acordo com as equações das potências de cozedura padronizada mostradas na figura 6.6, para um ΔT ($T_w - T_a$) igual a 50°C , obteve-se uma potência de $55 \pm 13\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 122.70 ± 2.40 e **b** igual a -1.35 ± 0.05 , para o dia 20/11/2017 e $33 \pm 15\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 63.25 ± 2.25 e **b** igual a -0.60 ± 0.05 para o dia 13/07/2018, no SUNTASTE COMPACT.

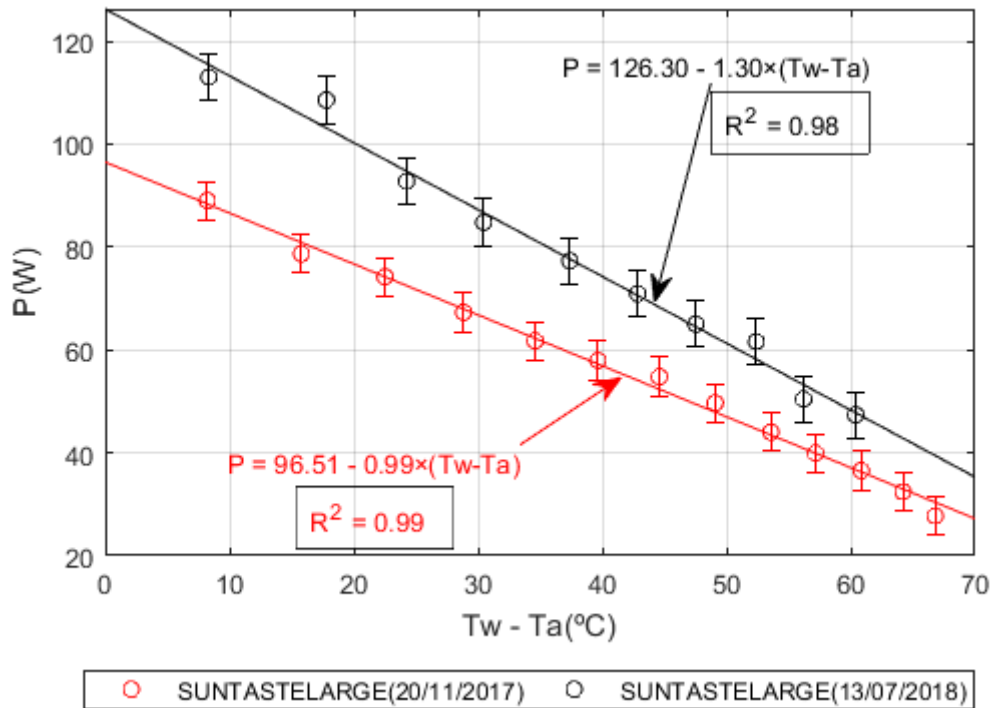


Figura 6.7 - Potência de cozedura do SUNTASTE LARGE.

De acordo com as equações das potências de cozedura mostradas na figura 6.7, para um ΔT ($T_w - T_a$) igual a 50°C , obteve-se uma potência de $47 \pm 17\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 96.51 ± 2.22 e **b** igual a -0.99 ± 0.05 , para o dia 20/11/2017 e $61 \pm 20\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 126.30 ± 5.20 e **b** igual a -1.30 ± 0.12 para o dia 13/07/2018, no SUNTASTE LARGE.

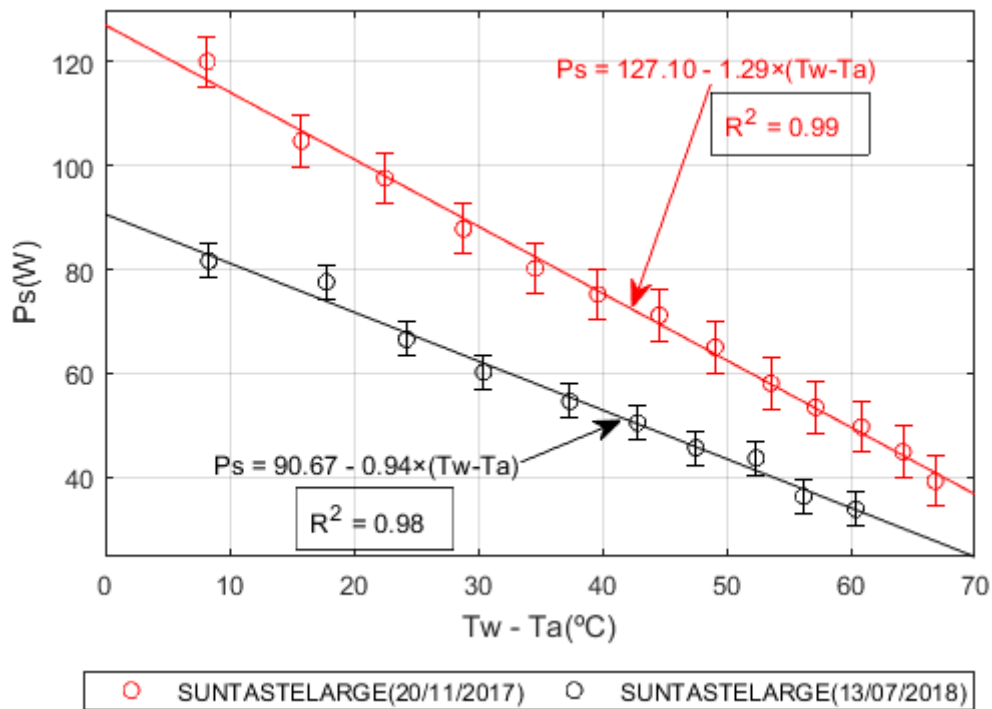


Figura 6.8 - Potência de cozadura padronizada do SUNTASTE LARGE.

De acordo com as equações das potências de cozadura padronizada mostradas na figura 6.8, para um ΔT ($T_w - T_a$) igual a 50°C , obteve-se uma potência de $63 \pm 17\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 127.10 ± 2.70 e **b** igual a -1.29 ± 0.06 , para o dia 20/11/2017 e $44 \pm 20\text{W}$ com os coeficientes **a** igual a 90.67 ± 3.42 e **b** igual a -0.94 ± 0.09 para o dia 13/07/2018, no SUNTASTE LARGE.

Analisando os resultados das potências de cozadura obtidas, verifica-se que em julho estas são mais altas do que em novembro, como já se esperava. Por outro lado, os resultados das potências de cozadura padronizada obtidas, são mais baixas em julho. Como em julho, apesar da massa de água utilizada ser maior, a radiação solar global na superfície horizontal é maior, então, estes valores são aceitáveis.

É de realçar que, os novos coeficientes propostos nesta dissertação têm uma importância imprescindível no cálculo da potência. Uma vez que, a potência depende da massa de água, é muito importante saber quantificar esta massa, como se explica para os novos coeficientes.

A diferença de potência medida no Inverno e medida no Verão, mesmo depois da padronização, em alguns casos, parece querer dizer que será interessante procurar uma nova definição que tenha uma maior independência sazonal. Esta será uma pista para trabalho futuro.

7. Conclusões

Em virtude do que foi estudado nesta dissertação, é imprescindível que todos se conscientizem de que este tema dará uma importante contribuição na análise da performance dos fornos solares de tipo caixa e na elaboração de uma nova norma de ensaios.

Os ensaios dos fornos solares permitem avaliar as suas performances e, assim, possibilitam aos usuários saberem informações relevantes acerca destes fornos. A temperatura de estagnação da placa em vários dias do ano e o tempo que a água demora para atingir a ebulição são umas das informações ambicionadas.

Os fornos solares de tipo caixa devido as suas capacidades de armazenar o calor por algum tempo são vistos como uma tecnologia promissora em algumas regiões do mundo. Outras propriedades que os qualificam é a boa performance, baixo custo e as suas facilidades de transporte. No que tange à performance, deve-se realizar ensaios experimentais e estes têm de seguir a norma de ensaios de fornos solares. Estes fornos estão a ser testados de acordo com a norma indiana, baseada nos procedimentos propostos por *Mullick* em [1], porém estes apresentam algumas limitações que têm grande impacto na performance destes tipos de forno. *Mullick* deu um grande contributo na elaboração dos procedimentos para avaliar estes fornos, mas será necessário apresentar novos procedimentos que visam corrigir as limitações da norma apresentado por ele. A norma indiana não aborda os fornos solares com concentração, visto que defendem que se o forno tiver um refletor, este deve ser tapado com um pano preto e, desta forma, afeta a performance do forno. Assim, o ângulo de captação do forno será sempre o mesmo durante toda a época do ano.

Sem tirar mérito ao esforço e trabalho desenvolvido por *Mullick*, este trabalho propõe novos procedimentos para ensaiar os fornos solares de tipo caixa, apresentando algumas melhorias aos procedimentos existentes. Os novos procedimentos visam explicar, de forma bem clara, a variação da área de captação destes fornos em épocas de ano distintas e, permite mostrar o impacto desta variação sazonal na performance do forno. De forma a comprovar a importância dos novos procedimentos propostos, para avaliar a performance dos fornos solares de tipo caixa, realizaram-se vários ensaios experimentais. Em suma, pode dizer-se que dos resultados obtidos, confirma-se que o coeficiente de mérito F_1 só pode ser medido nos fornos solares de tipo caixa sem concentração e que o novo coeficiente de mérito F_{1new} pode ser usado para avaliar tanto a performance dos

fornos solares de tipo caixa sem concentração como os com concentração e, este, pode ser medido em qualquer época do ano e para fornos solares de tipo caixa com geometrias diferentes.

Conclui-se ainda que, o coeficiente de mérito F_2 não pode ser usado em todas as épocas do ano. Este coeficiente de mérito não explica a relação entre a variação sazonal do sol com a área de captação da radiação. Assim sendo, a área de captação da radiação será sempre a mesma e a massa da água será sempre a mesma, em qualquer altura do ano, o que invalida a utilização deste coeficiente de mérito. Dos resultados obtidos dos ensaios experimentais, conclui-se que o novo coeficiente de mérito, F_{2new} pode ser medido nos fornos solares de tipo caixa, com geometrias diferentes e este coeficiente leva em consideração a relação entre a variação sazonal do sol com a área de captação da radiação. Em relação ao estudo da sazonalidade, deve-se fazer mais estudo para validar esta hipótese. Deste modo, surge mais um coeficiente muito prestigioso na análise da performance dos fornos solares de tipo caixa. No futuro procura-se afinar este coeficiente de mérito, considerando parâmetro que influencia o comportamento dos fornos, tal como, a velocidade do vento no dia de teste e, que por sua vez, tem uma influência na condensação da água no vidro da cobertura do forno, influenciando o valor das perdas térmicas e o dos ganhos solares.

Em relação ao tempo que a água vai da temperatura ambiente até a ebulição, afirma-se que o τ_{0new} reproduz muito bem este tempo, quando comparado com $\tau_{0medido}$. Assim, emerge um novo parâmetro (τ_{0new}) que vem provar a primazia dos novos coeficientes proposto. Surge assim, a possibilidade de transformar o τ_{0new} num novo coeficiente de mérito, como já se tinha especulado no *paper* [24].

No que tange a potência, é considerada, hoje, a melhor figura para comparar e qualificar os fornos. Contudo precisa de uma nova definição com maior independência sazonal.

Por fim, comprovou-se através dos ensaios experimentais, a importância dos novos procedimentos proposto. Estes novos procedimentos vêm dar uma maior preponderância na análise da performance dos fornos, apresentando resultados mais coerentes.

No mínimo, a nossa proposta vem no sentido de abandonarmos F_1 e F_2 propostos por Mullick e adotar, na futura norma os coeficientes F_{1new} e F_{2new} . Uma parte dos ensaios e conclusões deste capítulo, foram compilados dos trabalhos [23] e [24].

Como se pode verificar com os resultados experimentais obtidos nesta dissertação, a análise térmica do forno é um tema um pouco complexo. Os coeficientes de mérito propostos nesta dissertação conseguem medir a área de captação da radiação e, por conseguinte, a massa de água que é proporcional a esta área. No futuro será preciso propor novos coeficientes que levam em consideração a questão da sazonalidade e que caracteriza melhor o comportamento térmico do forno. Ainda, será preciso estudar a independência da potência de cozedura padronizada com a sazonalidade.

Em relação as ambições pessoais, considero-me num processo sempre inacabado de melhoria contínua e de aprendizagem gradual no decurso desta área de investigação.

8. Referências

- [1] S. C. Mullick, T. C. Kandpal e A. K. Saxena, “Thermal Test Procedure for Box-Type Solar Cookers,” *Sol. Energy*, vol. 39, pp. 353- 360, 1987.
- [2] BIS – Bureau of Indian Standards- second revision of IS, 13429 (part 1) – Solar Cooker-Box type- specification, Part 1-Requirements.
- [3] Agência Portuguesa do Ambiente. [ONLINE]. Disponível em: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=140>. [Acedido em: 28 de Outubro de 2017].
- [4] M. Collares Pereira, J.P. Almeida, “Description and Testing of a Novel Solar Box Type Cooker Incorporating CPC Type Optics,” *ISES Solar World Congress*, Goteborg, 2003.
- [5] P. A. Funk, “Evaluating the Internacional Standard Procedure for Testing Solar Cookers and Reporting Performance,” *Sol. Energy*, vol. 68, pp. 1-7, 2000.
- [6] Solar Cookers Internacional. *History of Solar Cooking* [ONLINE]. Disponível em: http://solarcooking.wikia.com/wiki/History_of_solar_cooking. [Acedido em: 30 de Outubro de 2017].
- [7] Solar Cooker at Cantina West. *History of Solar Cooking* [ONLINE]. Disponível em: <http://www.solarcooker-at-cantinawest.com/solarcooking-history.html>. [Acedido em: 30 de Outubro de 2017]
- [8] State of the Art of Solar Cooking Early Uses of the Sun to Serve Humanity. [ONLINE]. Disponível em: <https://vignette.wikia.nocookie.net/solarcooking/images/5/51/Sam.pdf/revision/1atest?cb=20070122015559>. [Acedido em: 28 de Novembro de 2017].
- [9] S. Geddam, G. K. Dinesh, T. Sivasankar, “Determination of Thermal Performance of a Box Type Solar Cooker”, *Sol. Energy*, vol. 113, pp. 324-331, 2015.
- [10] Whole Earth Catalog. [ONLINE]. Disponível em: <http://www.wholeearth.com/issue/2099/article/18/burning.mirrors>. [Acedido em: 30 de Novembro de 2017].

- [11] W. Calver, “Solar Stove”, *U.S. Patent 412, 725*, Oct. 15, 1889.
- [12] M. Telkes, “Solar Cooking Ovens”, *Sol. Energy*, vol. 3, pp.1-11, 1959.
- [13] H. Kurt, E. Deniz, e Z. Recebli, “An Investigation Into the Effects of Box Geometries on the Thermal Performance of Solar Cookers”, *Int. J. of Green Energy*, vol. 5, pp. 508-519, 2008.
- [14] SUN OK. SUNTASTE [ONLINE]. Disponível em: <http://www.sunok.eu/home/products/suntaste>. [Acedido em: 30 de Outubro de 2017].
- [15] S. C. Mullick, T. C. Kandpal, S. Kumar, “Testing of Box-Type Solar Cooker: Second Figure of Merit F_2 and its Variation With Load and Number of Pots”, *Sol. Energy*, vol. 57, pp. 409- 413, 1996.
- [16] ASABE – American Society of Agricultural and Biological Engineers, Testing and Reporting Solar Cooker Performance, ASAE S580, Nov. 2013.
- [17] A. Kundapur e Sudhir C. V., “Proposal for New World Standard for Testing Solar Cookers”, *J. of Engineering Science and Technology*, vol. 4, pp. 272-281, 2009.
- [18] M. E. de Castell, A. F. Pastrana, M. Collares Pereira, L. Vázquez, e A. Esteves, “Propuestas de Procedimiento Para la Evaluacion del Comportamiento Termico de Cocinas y Hornos Solares,” Red Iberoamericana de Cocción Solar de Alimentos, vol. 3, pp. 133-5, Averma, 1999.
- [19] E. Cuce, P. M. Cuce, “A Comprehensive review on solar cookers”, *Applied Energy*, vol. 102, pp. 1399-1421, 2013.
- [20] Solar Cookers International. *Introduction to solar cooking* [ONLINE]. Disponível em: http://solarcooking.wikia.com/wiki/Introduction_to_solar_cooking. [Acedido em: 30 de Outubro de 2017].
- [21] R. M. Muthusivagami, R. Velraj, R. Sethumadhavan, “Solar Cookers With and Without Thermal Storage-A Review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.14, pp. 691-701, 2010.
- [22] R. Winston, *Nonimaging Optics*, Academic Press, 2014.

- [23] A. Tavares, A. Cavaco, M. Collares Pereira, N. O. Martins, “The SUNTASTE, a New Cork Based Solar Box Cooker”, *CONSOLFOOD 2018 – International Conference on Advances in Solar Thermal Food Processing*, Faro, Janeiro 2018.
- [24] M. Collares Pereira, A. Cavaco, A. Tavares, “Figures of Merit and Their Relevance in the Context of a Standard Testing and Performance Comparison Methods for Solar Box- Cookers”, *Solar Energy*, vol. 166, pp. 21-27, 2018.
- [25] The Engineering ToolBox. Boiling point of water and altitude. [ONLINE]. Disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/boiling-points-water-altitude-d_1344.html. [Acedido em: 21 de Dezembro de 2017].
- [26] J. A. Duffie & W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. Nova Iorque: Wiley, 2013.
- [27] International Organization for Standardization 9060, *Solar Energy- Specification and Classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*, Novembro 1990.
- [28] Kipp and Zonen, *Instruction Manual*, Outubro 2016.

9. Anexos

Anexo1: Cálculo da concentração média do SUNTASTE (COMPACT e LARGE)

Tabela 9.1 – Concentração: mensal e média anual do SUNTASTE (COMPACT e LARGE).

Mês	Θ (°)	A _n SUNTASTE COMPACT (m ²)	A _n SUNTASTE LARGE (m ²)	C SUNTASTE COMPACT	C SUNTASTE LARGE
Janeiro	58.71	0.217	0.286	2.009	1.907
Fevereiro	49.36	0.233	0.307	2.157	2.047
Março	38.75	0.247	0.325	2.287	2.167
Abril	27.41	0.256	0.337	2.370	2.247
Maio	19.6	0.259	0.341	2.398	2.273
Junho	16.38	0.259	0.341	2.398	2.273
Julho	19.15	0.259	0.341	2.398	2.273
Agosto	27.32	0.256	0.337	2.370	2.247
Setembro	38.52	0.247	0.325	2.287	2.167
Outubro	49.7	0.232	0.306	2.148	2.040
Novembro	58.83	0.217	0.286	2.009	1.907
Dezembro	62.37	0.210	0.277	1.944	1.847
				2.231	2.116
Média					

Anexo 2:

Na tabela que se segue apresenta-se as especificações técnicas do piranómetro utilizado para a obtenção dos dados da radiação global na superfície horizontal.

Tabela 9.2 - Especificações técnicas do piranómetro *Kipp and Zonen – CMP11* e a sua classificação segundo a norma ISO 9060:1990.

1	Response time (95 %)
2	Zero offsets (a) Response to 200 W/m ² net thermal radiation (ventilated) (b) Response 5 K/hr change in ambient temperature
3a	Non-stability percentage change in responsivity per year
3b	Non-linearity percentage deviation from the responsivity at 500 W/m ² due to the change of irradiance within the range 100 W/m ² to 1000 W/m ²
3c	Directional response (for beam radiation) the range of errors caused by assuming that the normal incidence responsivity is valid for all directions when measuring from any direction a beam of radiation whose normal incidence irradiance is 1000 W/m ²
3d	Spectral selectivity percentage deviation of the product of spectral absorptance and spectral transmittance from the corresponding mean within 0.35 µm and 1.5 µm
3e	Temperature response percentage deviation due to change in ambient temperature within an interval of 50 K
3f	Tilt response percentage deviation from the responsivity at 0° tilt (horizontal) due to change in tilt from 0° to 90° at 1000 W/m ² irradiance

Reference number	ISO Pyranometer Categories			CMP3	CMP 6/CMA 6	CMP10, 11/CMA 11	CMP 21	CMP 22
	Second Class	First Class	Secondary Standard	Second Class	First Class	Secondary Standard	Secondary Standard	Secondary Standard
1 Response time (95 %)	< 60 s	< 30 s	< 15 s	< 18 s	< 18 s	< 5 s	< 5 s	< 5 s
2 Zero offsets (a) (b)	± 30 W/m ² ± 8 W/m ²	± 15 W/m ² ± 4 W/m ²	± 7 W/m ² ± 2 W/m ²	< 15 W/m ² ⁽¹⁾ < 5 W/m ²	< 15 W/m ² ⁽¹⁾ < 4 W/m ²	< 7 W/m ² ⁽¹⁾ < 2 W/m ²	< 7 W/m ² ⁽¹⁾ < 2 W/m ²	< 3 W/m ² ⁽¹⁾ < 1 W/m ²
3a Non-stability	± 3.0 %	± 1.5 %	± 0.8 %	< 1 %	< 1 %	< 0.5 %	< 0.5 %	< 0.5 %
3b Non-linearity	± 3 %	± 1 %	± 0.5 %	< 1 %	< 1 %	< 0.2 %	< 0.2 %	< 0.2 %
3c Directional response (for beam radiation)	± 30 W/m ²	± 20 W/m ²	± 10 W/m ²	< 20 W/m ² up to 80° zenith angle	< 20 W/m ² up to 80° zenith angle	< 10 W/m ² up to 80° zenith angle	< 10 W/m ² up to 80° zenith angle	< 5 W/m ² up to 80° zenith angle
3d Spectral selectivity	± 10 %	± 5 %	± 3 %	< 3 %	< 3 %	< 3 %	< 3 %	< 3 %
3e Temperature response	8 %	4 %	2 %	< 5 % (-10°C to +60°C) Interval of 50 K	< 4 % (-10°C to +60°C) Interval of 50 K	< 1 % (-10°C to +60°C) Interval of 50 K	< 1 % (-30°C to +50°C) Interval of 70 K	< 0.5 % (-30°C to +50°C) Interval of 70 K
3f Tilt response	± 5 %	± 2 %	± 0.5 %	< 1 %	< 1 %	< 0.2 %	< 0.2 %	< 0.2 %

⁽¹⁾ without ventilation

Anexo 3: Ensaio dos SUNCOOK's.

Em anexo 3 mostra-se todos os gráficos, relativamente a todos os ensaios descritos na secção 5.1.

Ensaio de temperatura de estagnação da placa

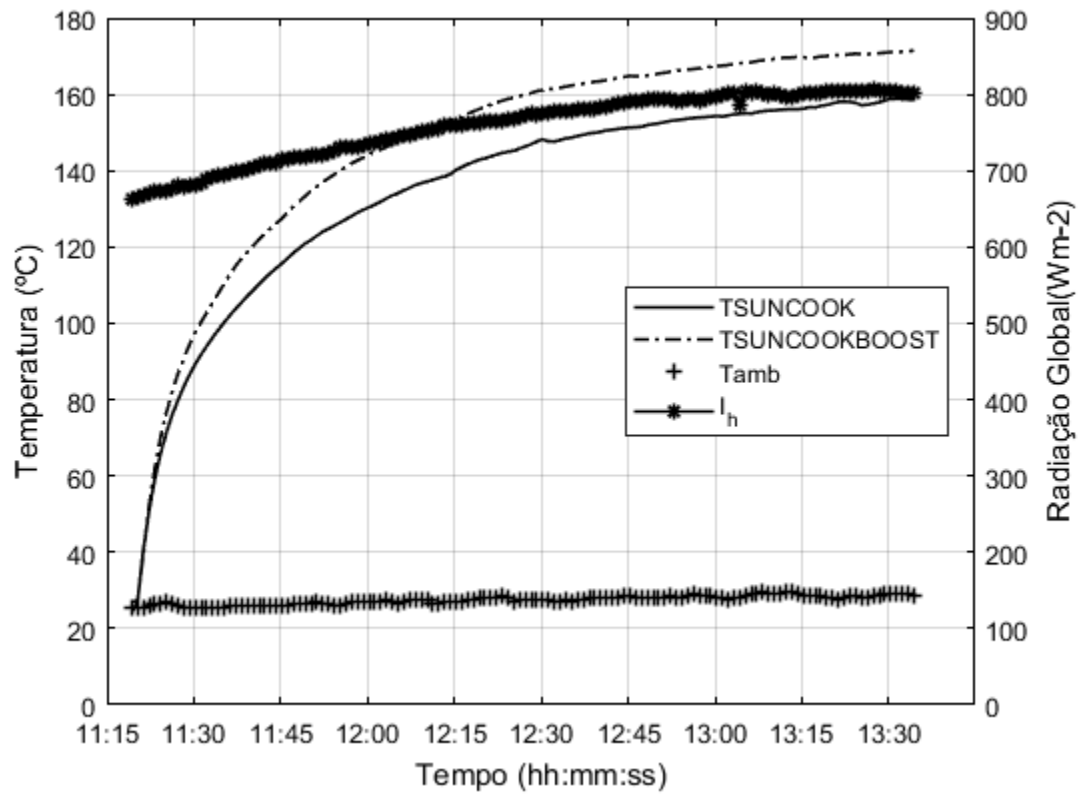


Figura 9.1 - Evolução da temperatura da placa dos SUNCOOK's com o tempo (25-09-2017).

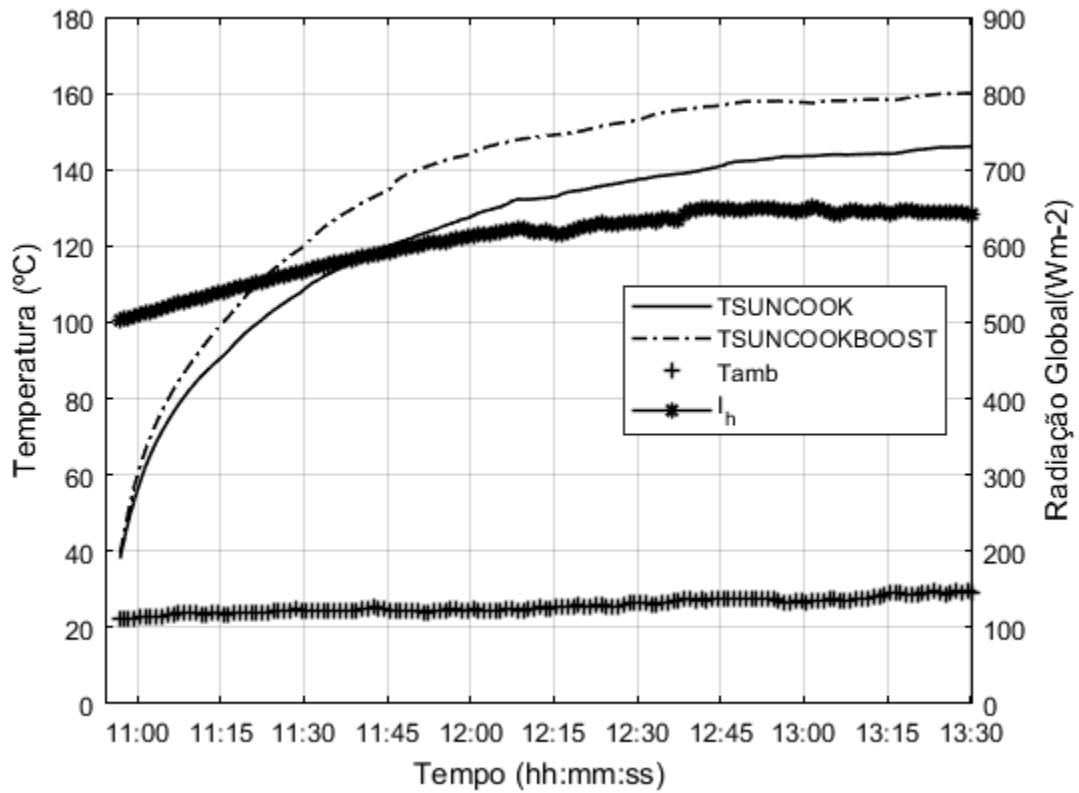


Figura 9.2 - Evolução da temperatura da placa dos SUNCOOK's com o tempo (23-10-2017).

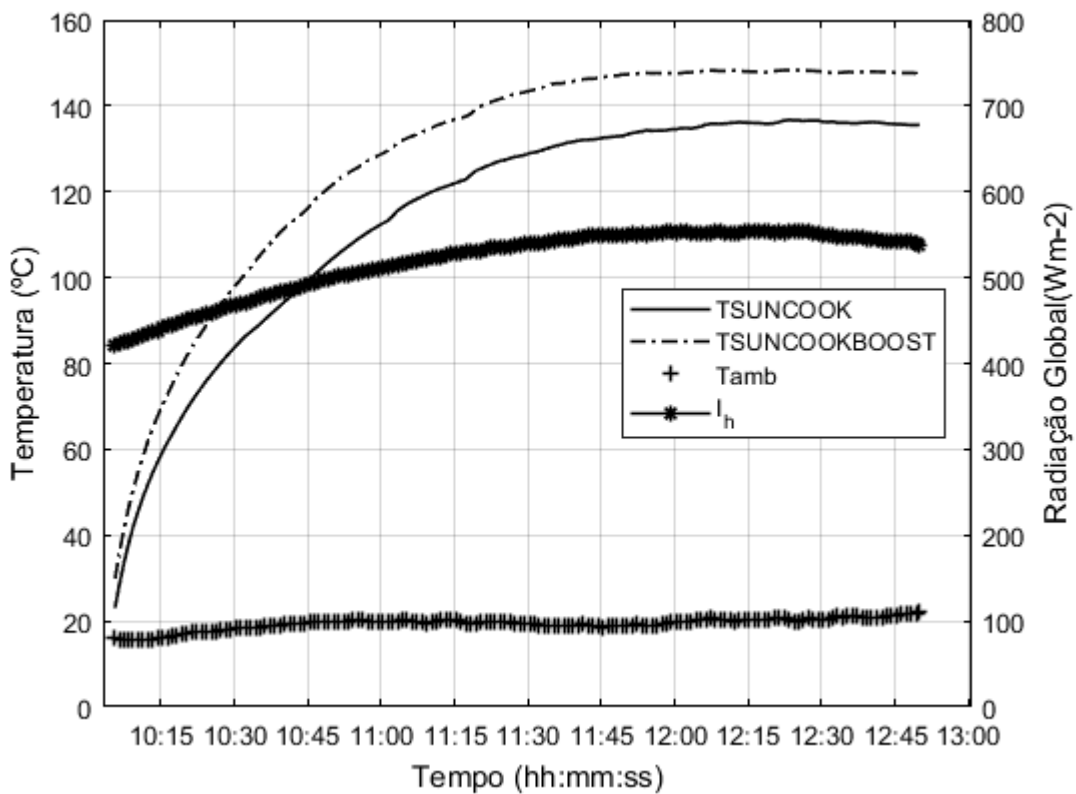


Figura 9.3 - Evolução da temperatura da placa dos SUNCOOK's com o tempo (15-11-2017).

Ensaio de temperatura de estagnação da placa, com o refletor tapado

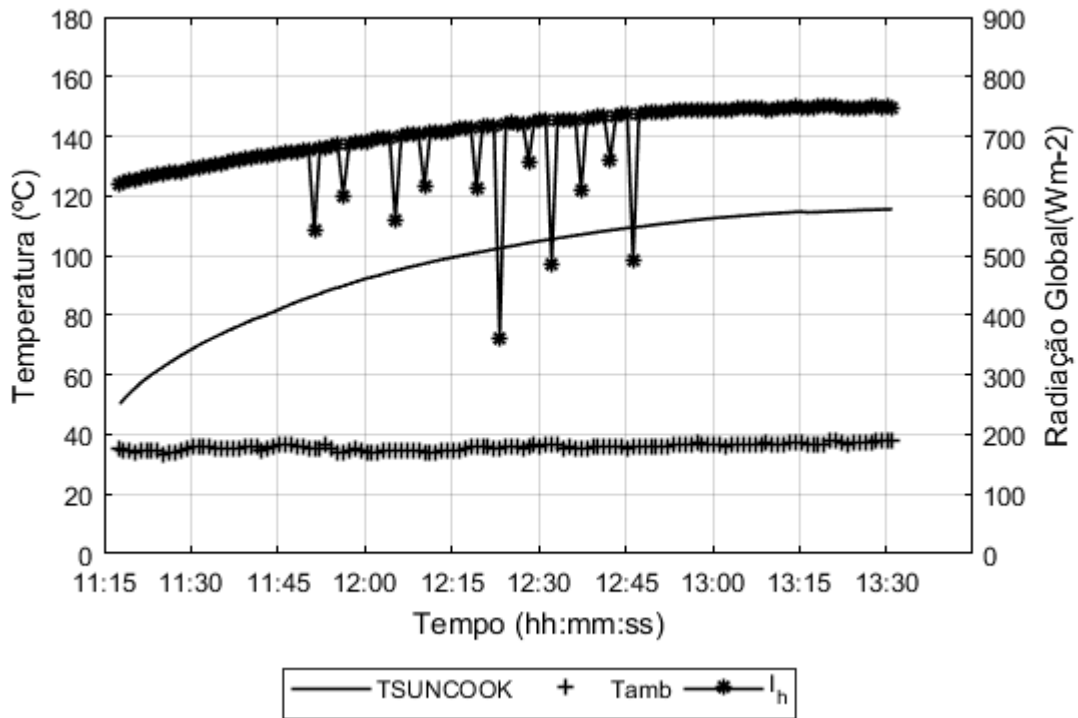


Figura 9.4 - Evolução da temperatura da placa dos SUNCOOK's com o tempo, seguindo a norma indiana (02-10-2017).

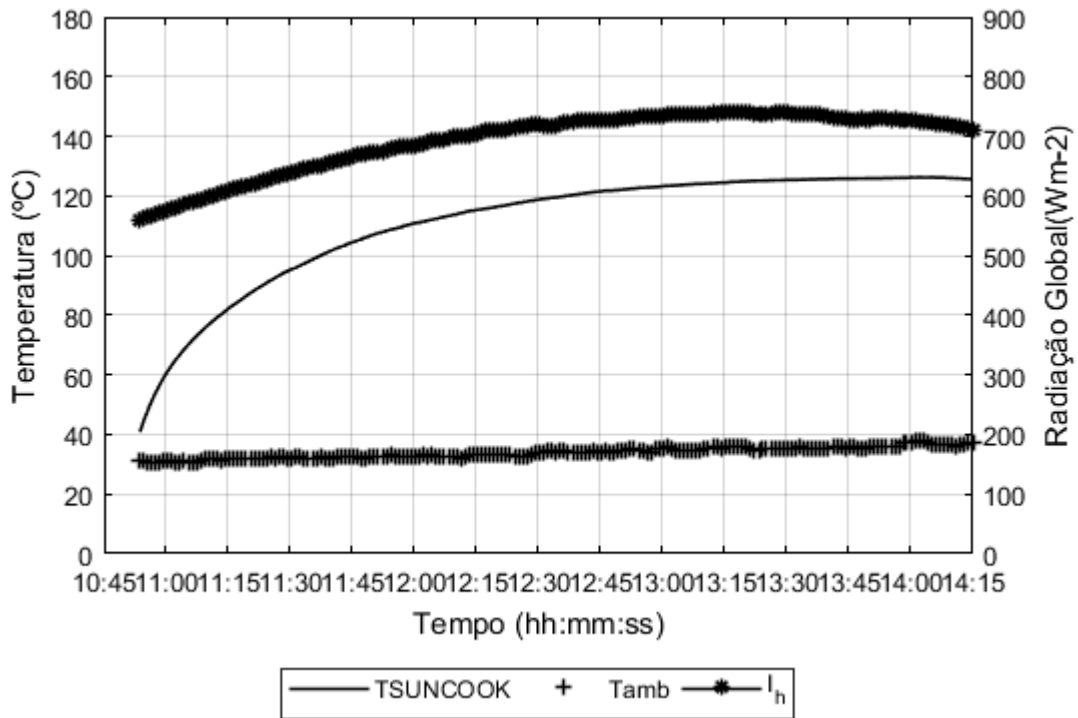


Figura 9.5 - Evolução da temperatura da placa dos SUNCOOK's com o tempo, seguindo a norma indiana (03-10-2017).

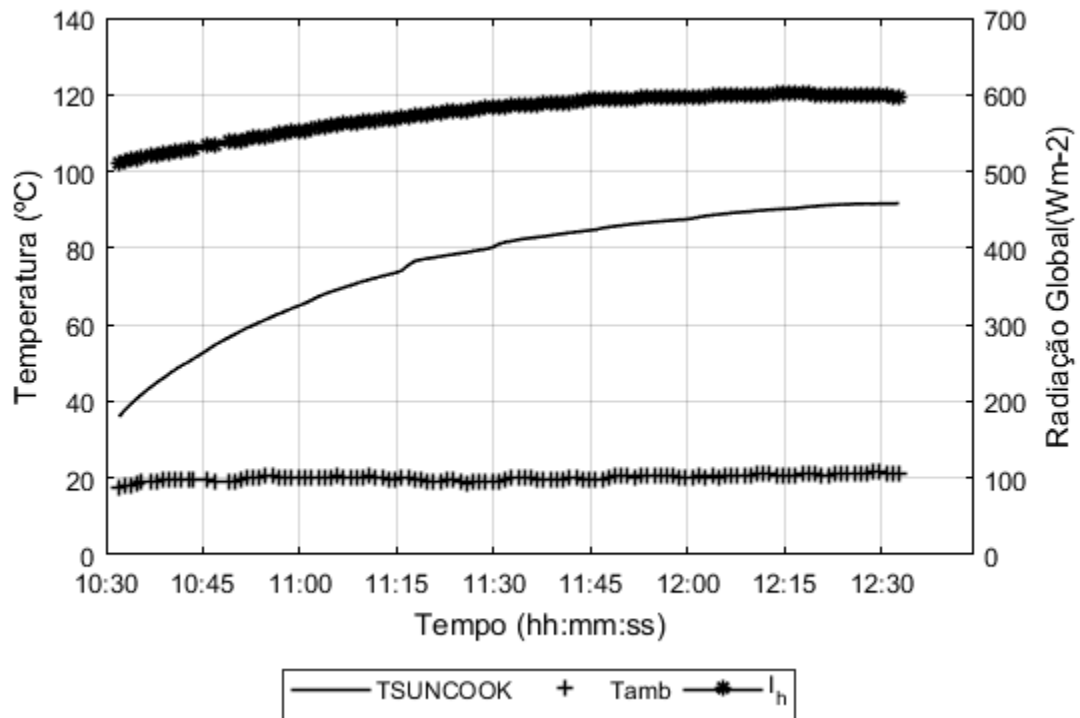


Figura 9.6 - Evolução da temperatura da placa dos SUNCOOK's com o tempo, seguindo a norma indiana (06-10-2017).

Ensaio com a água – Comportamento térmico do forno

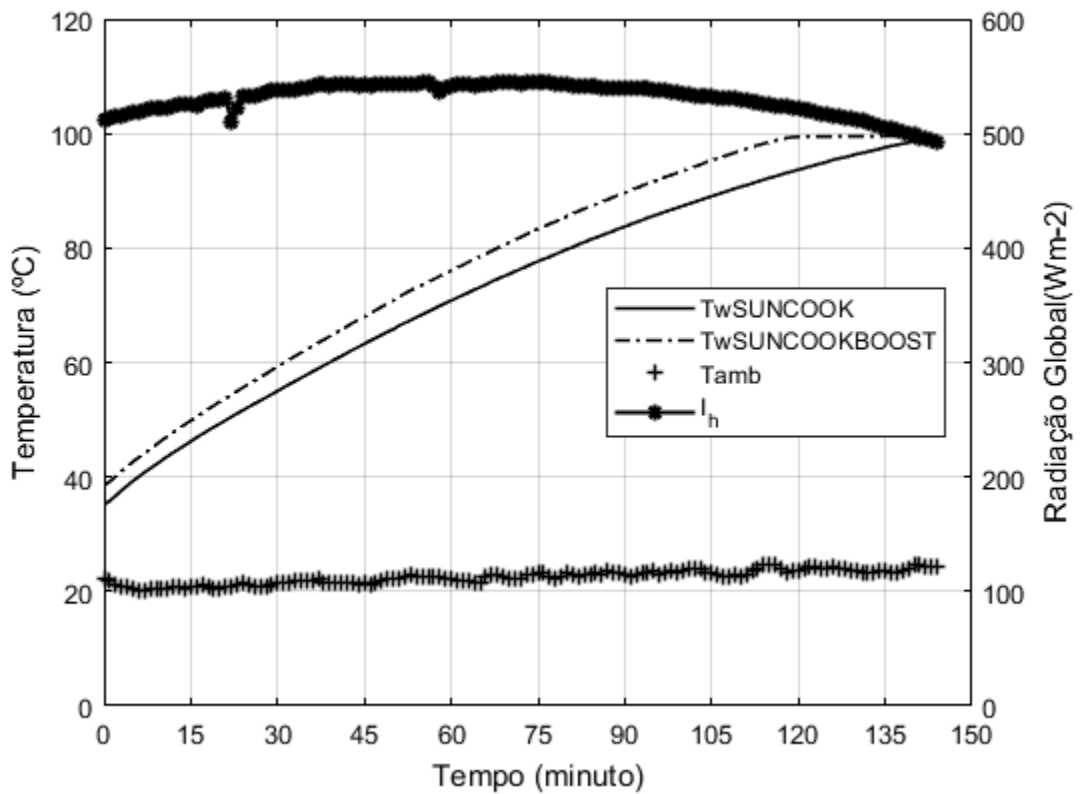


Figura 9.7 - Evolução da temperatura da água dos SUNCOOK's ao longo do tempo (16-11-2017).

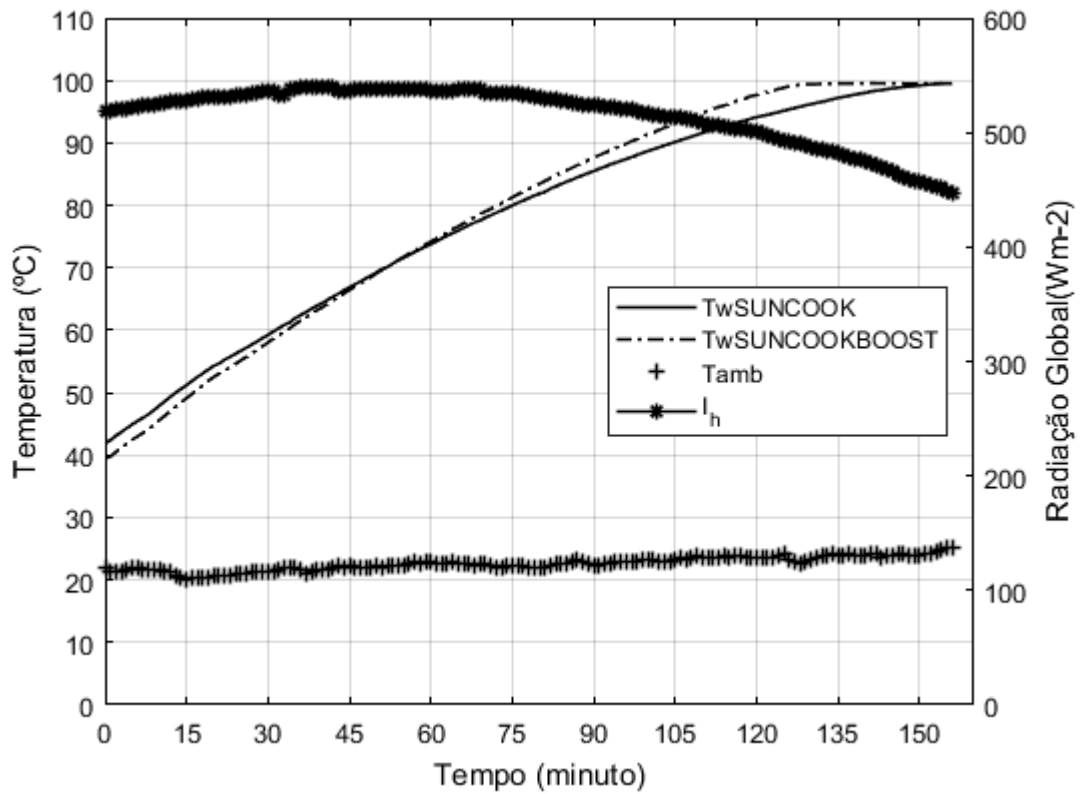


Figura 9.8 - Evolução da temperatura da água dos SUNCOOK's ao longo do tempo (17-11-2017).

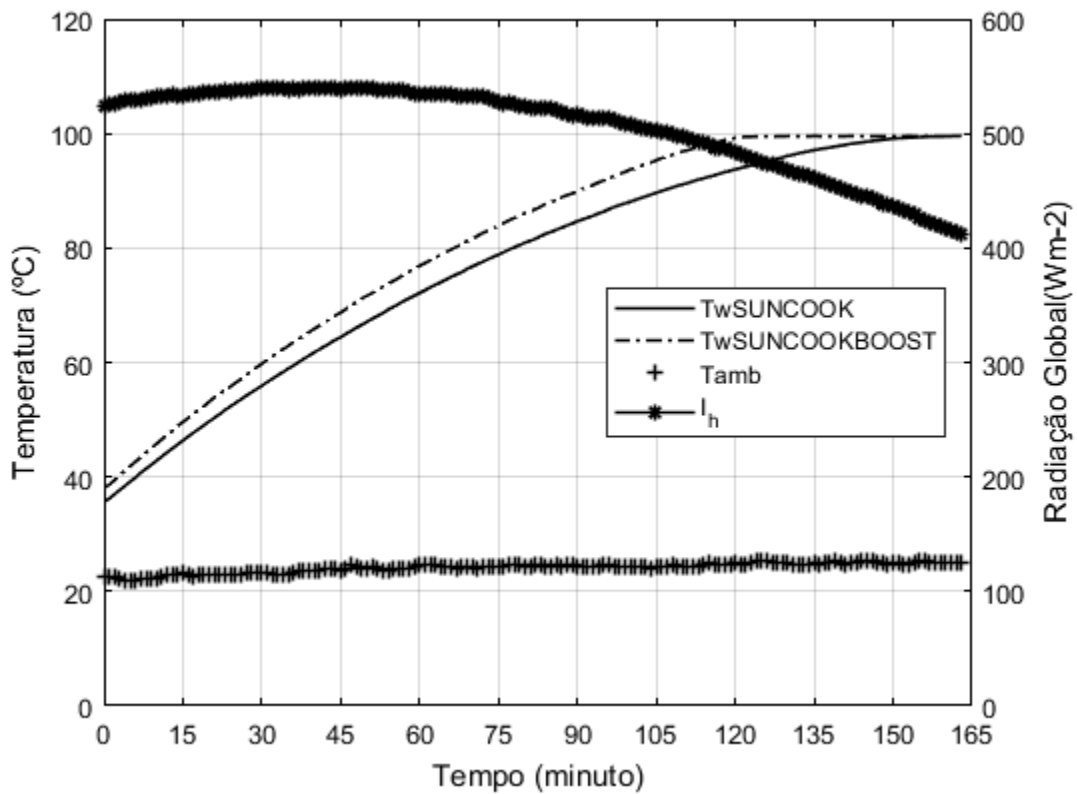


Figura 9.9 - Evolução da temperatura da água dos SUNCOOK's ao longo do tempo (20-11-2017).

Anexo 4: Ensaio com o SUNTASTE (COMPACT e LARGE)

Em anexo 4 mostra-se todos os gráficos, relativamente a todos os ensaios realizados com supracitados fornos (ensaios descritos na secção 5.2).

Ensaio de temperatura de estagnação da placa

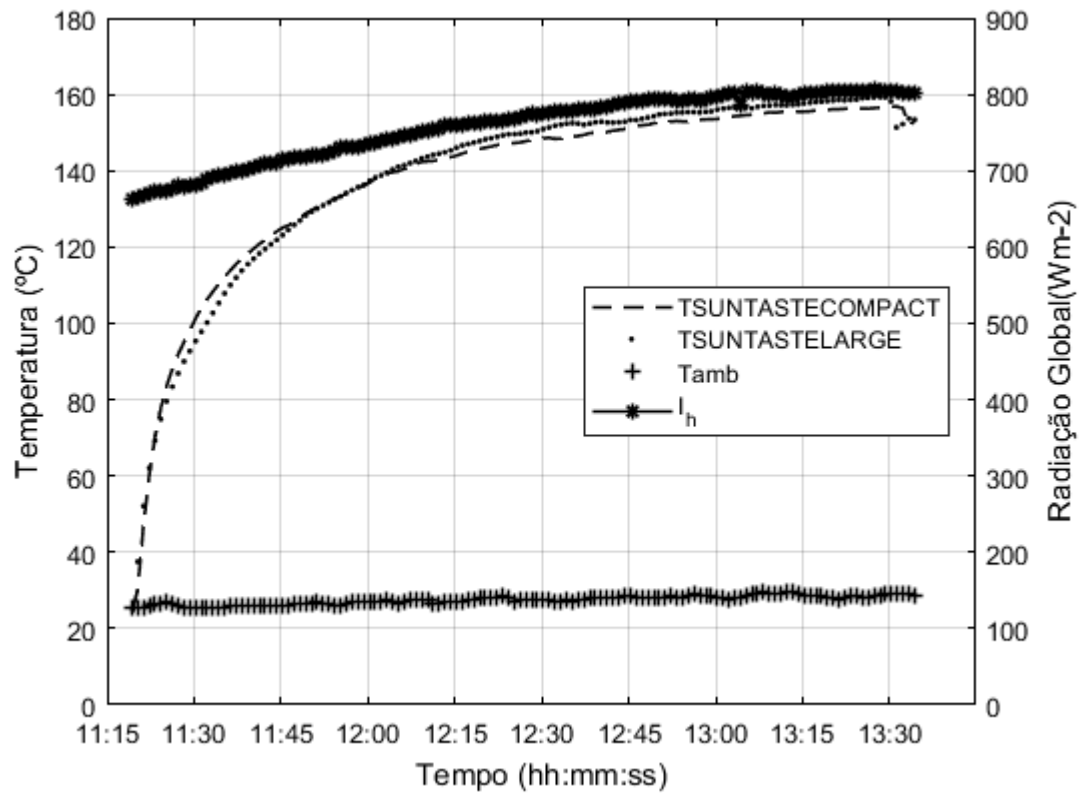


Figura 9.10 - Evolução da temperatura da placa dos SUNTASTE's com o tempo (25-09-2017).

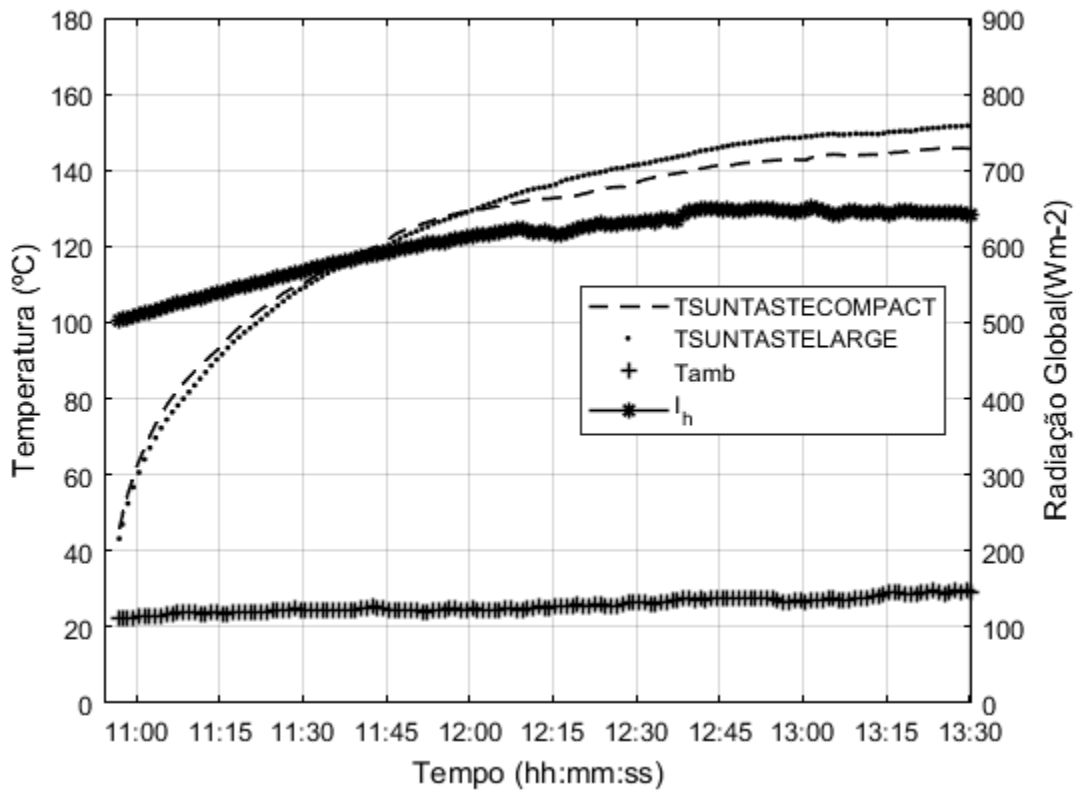


Figura 9.11 - Evolução da temperatura da placa dos SUNTASTE's com o tempo (23-10-2017).

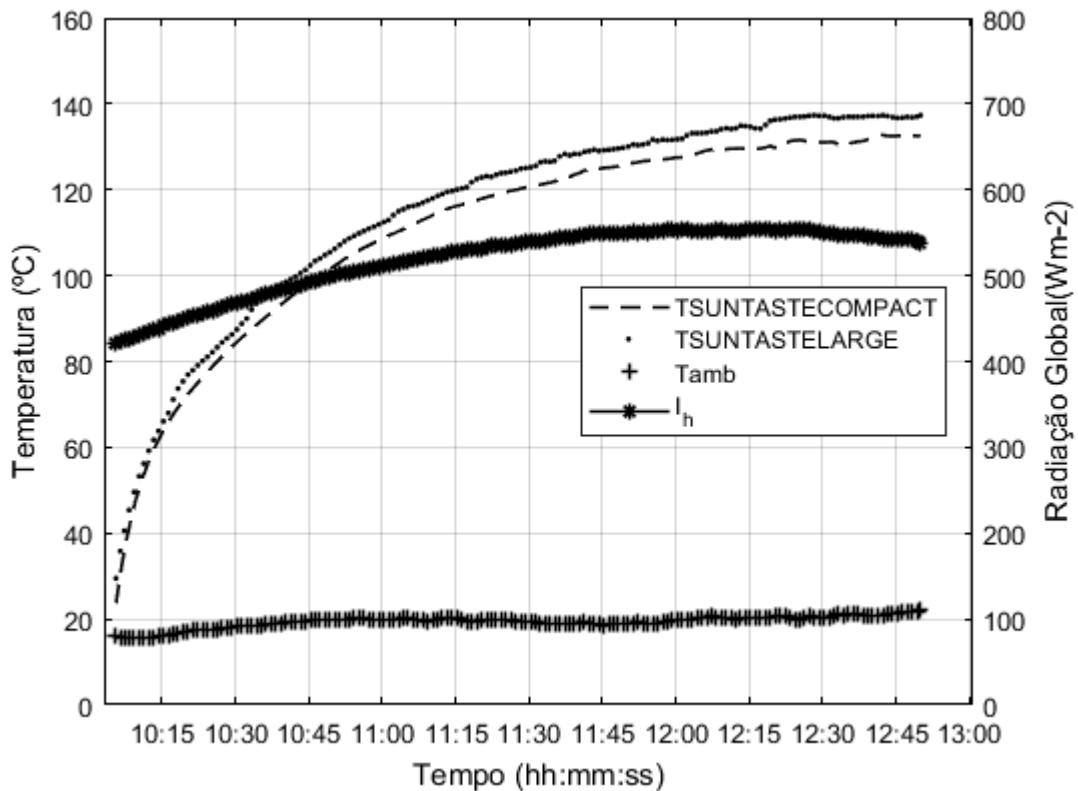


Figura 9.12 - Evolução da temperatura da placa dos SUNTASTE's com o tempo (15-11-2017).

Ensaio com a água – Comportamento térmico do forno

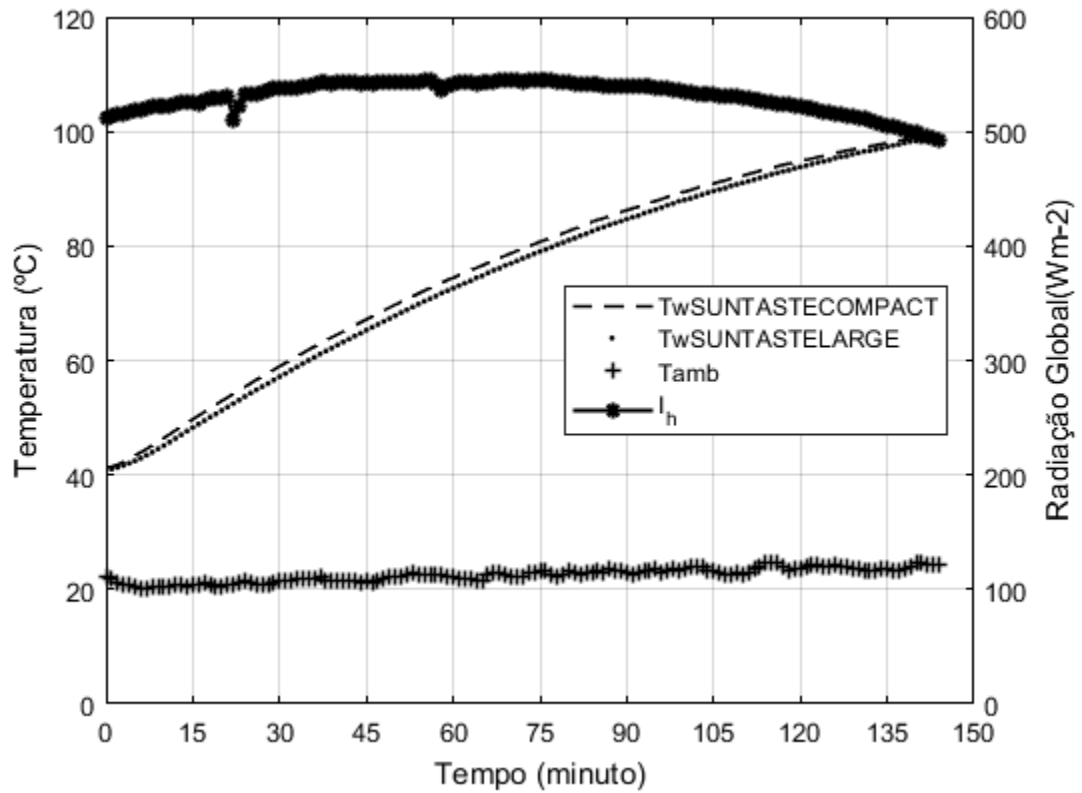


Figura 9.13 - Evolução da temperatura da água dos SUNTASTE's ao longo do tempo (16-11-2017).

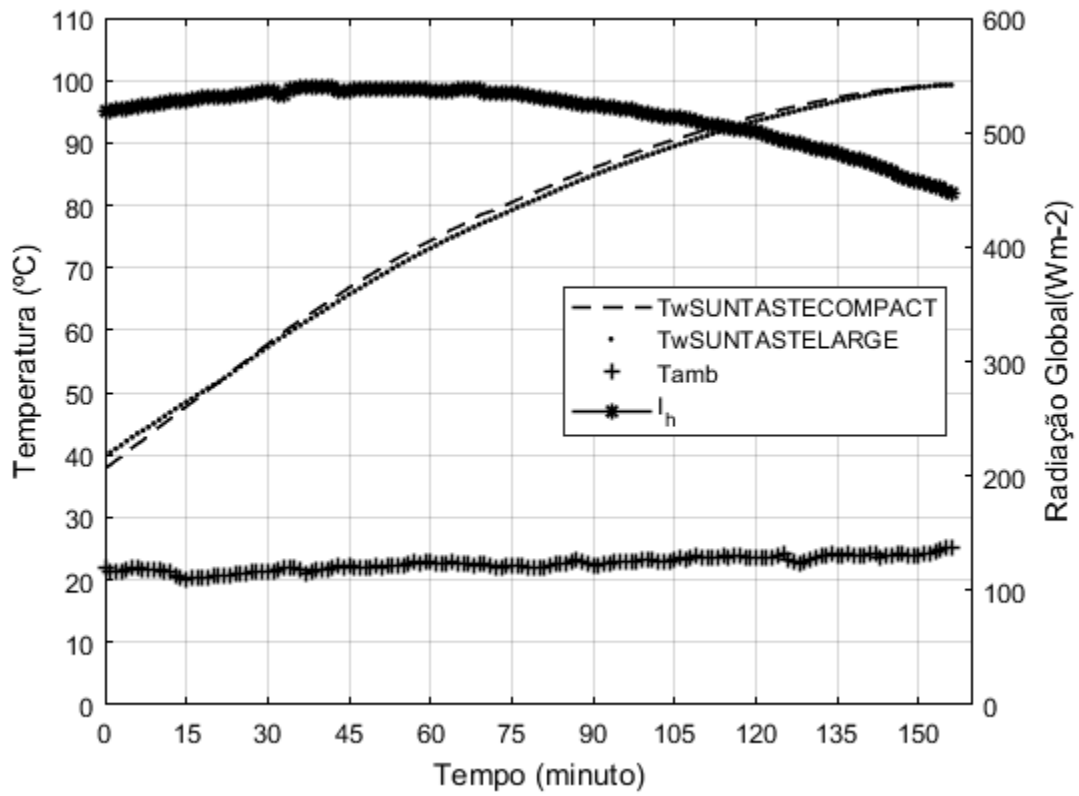


Figura 9.14 - Evolução da temperatura da água dos SUNTASTE's ao longo do tempo (17-11-2017).

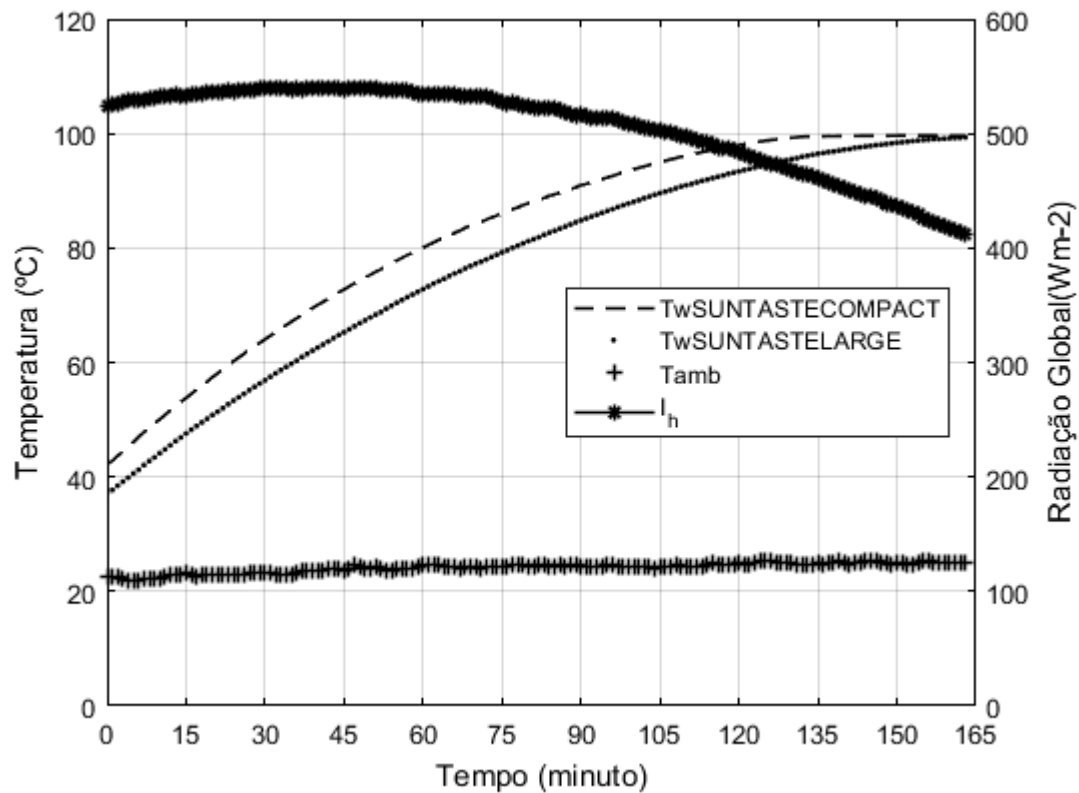


Figura 9.15 - Evolução da temperatura da água dos SUNTASTE's ao longo do tempo (20-11-2017).

Anexo 5: Estudo da Sazonalidade

Nas figuras seguintes, mostram-se a evolução das temperaturas das placas, dos quatro fornos, com o tempo e a evolução das temperaturas da água, nos quatro fornos, com o tempo. Ambos os ensaios foram realizados no verão.

Ensaio de estagnação da placa

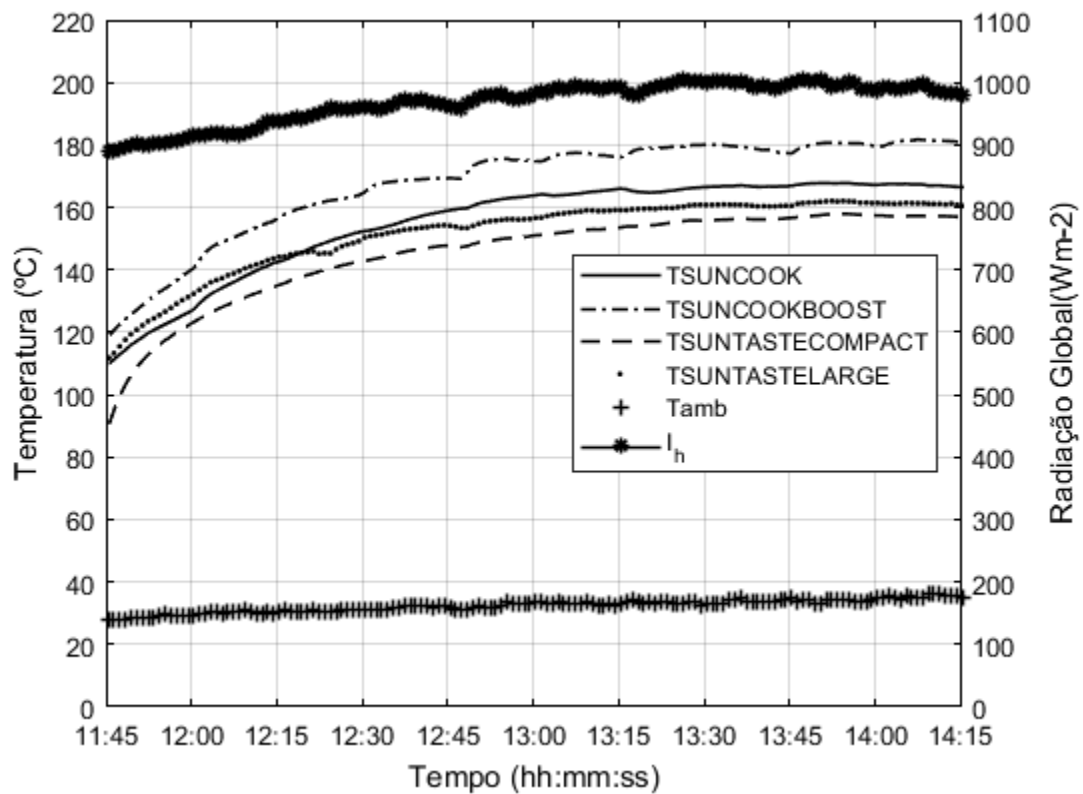


Figura 9.16 - Evolução da temperatura da placa, dos quatro fornos, com o tempo (09-07-2018).

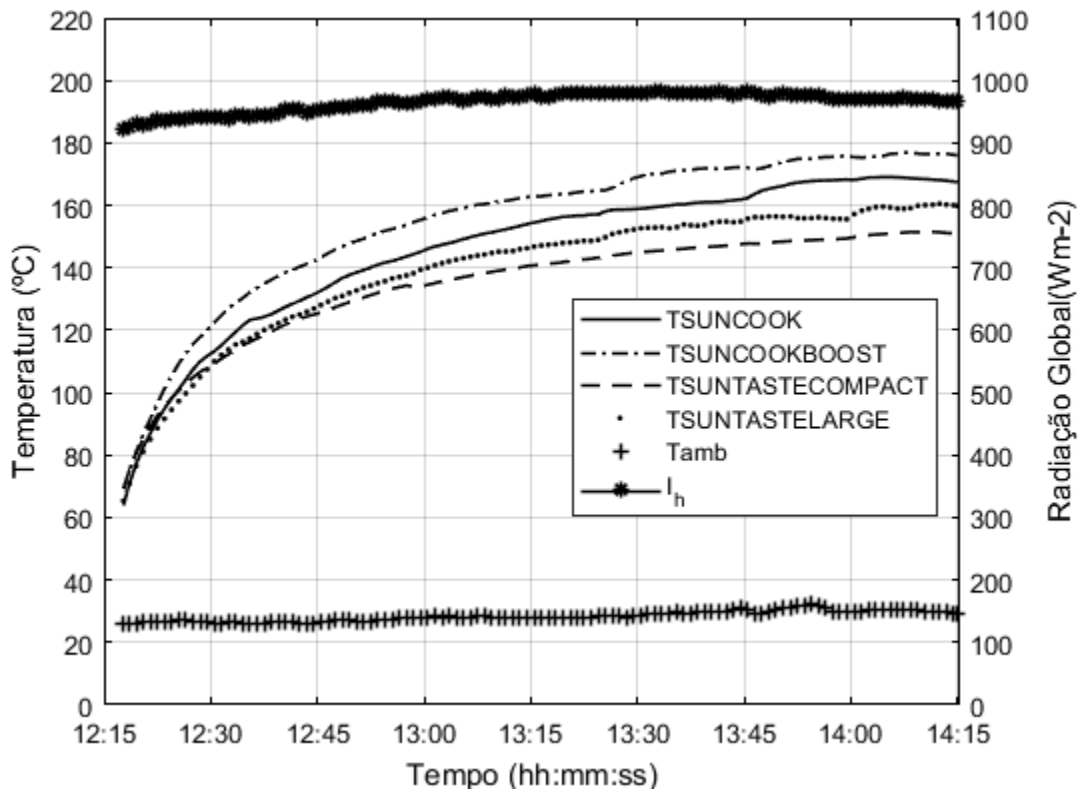


Figura 9.17 - Evolução da temperatura da placa, dos quatro fornos, com o tempo (25-07-2018).

Ensaio com a água – Comportamento térmico do forno

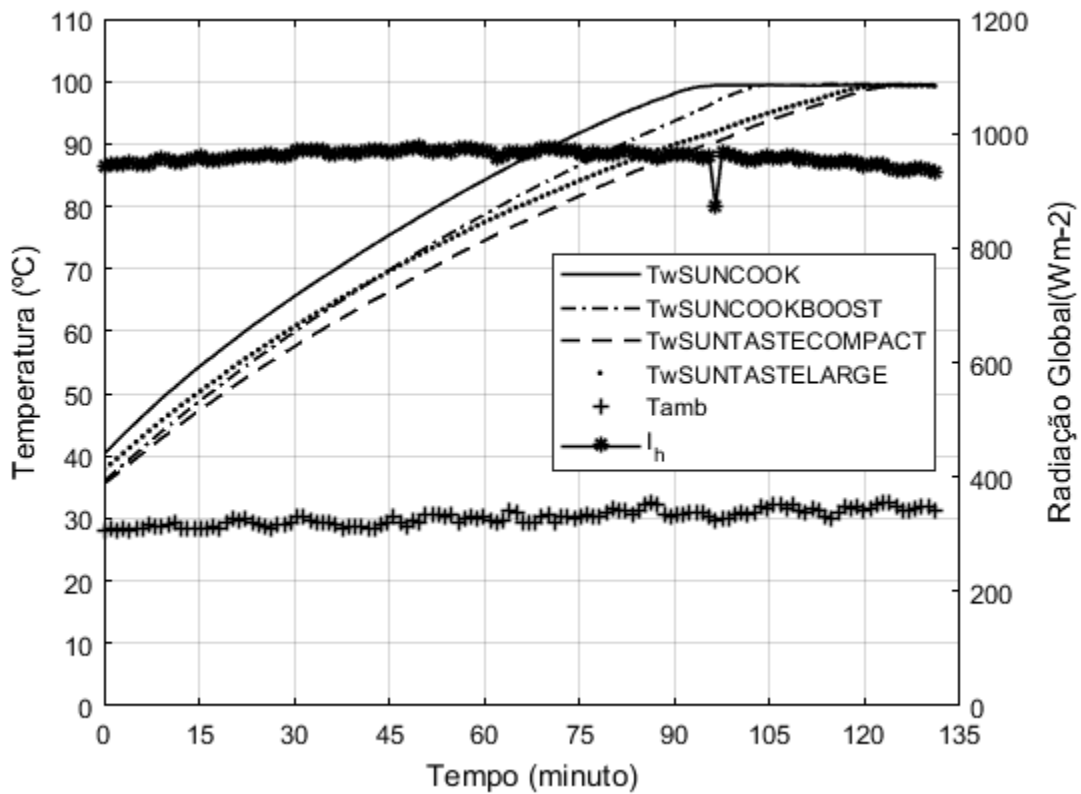


Figura 9.18 - Evolução da temperatura da água, dos quatro fornos, ao longo do tempo (11-07-2018).

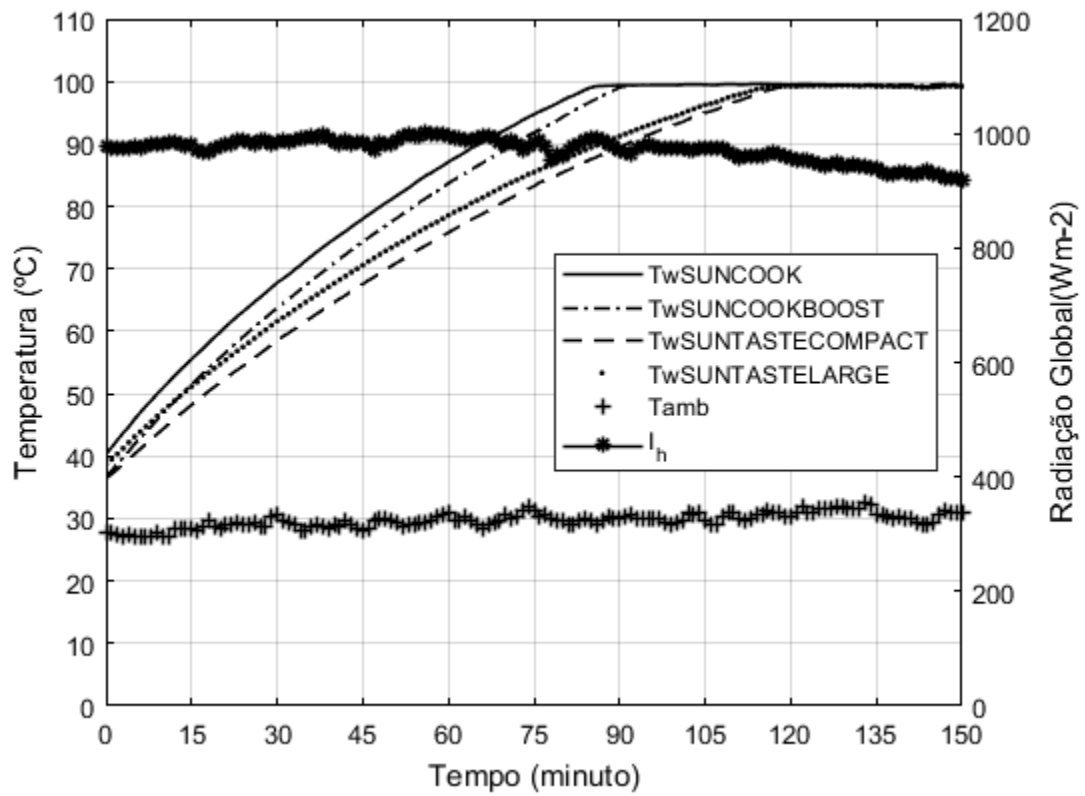


Figura 9.19 - Evolução da temperatura da água, dos quatro fornos, ao longo do tempo (13-07-2018).

Anexo 6: Paper apresentado na Conferência Internacional sobre avanços no processamento solar térmico dos alimentos.

CONSOLFOOD 2018 – International Conference on Advances in Solar Thermal Food Processing
Faro-Portugal, 22-24 January, 2018

The SUNTASTE, a new cork based solar box cooker

Ailton Tavares^{1*}, Afonso Cavaco^{1,2}, Manuel Collares-Pereira¹ and Nuno Oliveira Martins³

1: Renewable Energies Chair, University of Évora, IIFA, Largo Marquês de Marialva, 7002-554, Évora, Portugal.

e-mail: {acmt, collarespereira} @uevora.pt, web: <http://www.en.catedraer.uevora.pt/>

2: Portuguese Solar Energy Institute, IPES, Largo Marquês de Marialva, 7002-554, Évora, Portugal.

e-mail: afonso.cavaco@ipes.pt, web: <http://www.ipes.pt>

3: SunOk, LDA, Campo de Ourique, Lisboa, Portugal.

e-mail: nom@sunok.eu, web: <http://www.sunok.eu/>

Abstract: *Following the experience with the SUNCOOK [1], a plastic based box type solar cooker incorporating non imaging optics as a way to produce a certain degree of solar energy concentration (a factor of 2.0 X concentration on average) while retaining it stationary for full operation for periods as large as 3 hours, the idea came for developing a new cooker, the SUNTASTE [2], with an improved geometrical configuration and ease of operation (stationarity), this time based on a natural material: cork. The choice of cork offers the possibility of having it both as the structural element for the whole box, and at the same time taking advantage of the fact that it is highly insulating.*

Two versions of the SUNTASTE with different sizes but essentially with the same optics, were produced and tested according to the method defined in [3,4]. The tests of both versions were carried out in several consecutive high DNI days and also included a SUNCOOK for the sake of a direct comparison. The paper provides a brief description of the new cooker and presents the testing results of the two prototypes of each size produced. It can be reported that preliminary measurements show that is fair to expect for the new product, a performance in many regards comparable to that of the SUNCOOK.

Keywords: Solar Cooking Performance, Solar Cookers.

1. INTRODUCTION

Solar box cookers have known a continuous development since they were proposed [5] as early as in the sixties of the previous century. Simple box designs, with cooking plates at the bottom, augmenting mirrors placed in cover lids, side mirrors to enhance stationarity under operation or to providing extra solar irradiance concentration, have been proposed and tested. Tilted covers have also been a fixture of some of the models proposed and many of these cookers have been used all over the World, either as products to be purchased on the market or produced by their users directly, built according to plans provided by solar cooking promoters, individuals and organizations [5,6].

One cooker has been particularly successful, incorporating inside the box, non-imaging optic concentrators [7], thus enhancing its thermal and optical performance [1]. This solar cooker was a truly industrial product, fabricated in plastic (different kinds of plastic, pending on temperature and their location within the cooker) with a substantial input from the Portuguese plastics and plastic molds industry [8,9].

The use of plastic is certainly interesting from the point of view of product manufacturing and quality assurance, but also from the point of view of potential low cost, quite beyond those already achieved (under development). However, and in the meantime, new directions are being explored and one of them is the basis of the efforts reported in this paper.

The idea is to use another abundant material, cork as the main material in the cooker. Cork is a natural material with excellent thermal properties, a natural insulator ($k= 0,045$ W/mK) and at the same time strong enough to be, by itself, the structural material of the cooker. It is easy to form/machine to the necessary shape, and, thus it is an excellent base for solar cooker production. There is also top manufacturing experience of cork products in Portugal, quite besides the fact that Portugal is the primary World producer of cork.

This paper describes briefly such a cooker, the SUNTASTE, presently produced in two models (Compact and Large). It then presents results of measurements made during the fall of 2017. Because, during the fall, the sun has already a low altitude in the sky at the latitude at which the cooker was tested, it was thought interesting to compare it with the SUNCOOK, referred above, to give a measure of its highest available performance at other times of the year. The paper ends with some brief conclusions.

2. SUNTASTE DESCRIPTION

A photograph of the cooker can be seen in Fig.1, showing the two versions (Compact and Large) side by side. As can be seen, cork is used for the side walls, front and back wall. The lid is manufactured in aluminum. The cooker has a double glass cover with the bottom glass slid into place and the top glass glued to the cork. The cover is tilted to an angle of 17° chosen to minimize condensation accumulation on the bottom glass surface (condensed water will slide down truly minimizing negative effects of the cover on transparency).

The cooking plate is a black anodized aluminum (2,5 mm thick) plate, laying at the bottom, which can be removed for cleaning. Dimensions of both cookers can be seen in Table 1.

Table 1- Dimensions of SUNTASTE COMPACT and SUNTASTE LARGE.

SUNTASTE	External dimensions (cm)	Plate area (cm)	Cover area (cm)
COMPACT	52×43×32	36×30	44×36
LARGE	66×43×32	50×30	58×36

The rectangular shape was chosen to reduce the effects of longitudinal (E-W) losses of incoming solar irradiance and its dimensions were chosen as a function of practical considerations [2] of the manufacturer, production and commercial ones, related, for instance to the number and size of pots and pans that are provided or recommended to be used with the SUNTASTE.

The choice made in terms of geometry and dimensions correspond to an average concentration value (A_r/A_p) of approximately 2X.



Figure 1 - The SUNTASTE, (COMPACT and LARGE) front and back view.

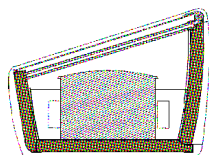


Figure 2 - cross section on transversal plane of the SUNTASTE.

Acceptance angles of the SUNTASTE (COMPACT and LARGE) and hours of stationarity provided, can be seen in table 2. Cork thickness for bottom and side walls can be seen in table 3.

Table 2 - Acceptance angles of the CPC walls and hours of stationarity provided.

Element	Acceptance angle θ_a (deg)	Stationarity time (h)
Front CPC	59.8	4.0
Side CPC	48.6	3.2

Table 3 - Wall thickness.

SUNTASTE	Thickness bottom walls (cm)	Thickness side walls (cm)
COMPACT	2.5	3.1
LARGE	2.5	3.1

3. MEASUREMENTS AND RESULTS

The two SUNTASTES were tested side by side with the SUNCOOK [1]. The idea for doing so came from the fact that this cooker was well characterized then and the comparison made here, will allow for extrapolations of results to be expected at other times of the year. This procedure highlights once more the need for universally accepted standards, which will facilitate cookers comparison in the future. In any case two Figures of Merit F_1 and F_2 discussed in [4] are calculated and one result is derived from them, time from ambient to boiling, is presented. F_1 is given by

$$F_1 = \frac{\eta'_0}{U_L} = \frac{A_p (T_{ps} - T_{as})}{A' I_{hs}} \quad (1)$$

$$A' = \left[A_c \times \frac{\cos(\theta - \delta)}{\cos\theta} + \left(\frac{A_n}{\cos\theta} - A_c \times \frac{\cos(\theta - \delta)}{\cos\theta} \right) \times \rho \right] \quad (2)$$

$$A_n = A_H \times \cos\theta \times \left(\frac{\cos(\theta - \delta)}{\cos\theta} \right) \quad (3)$$

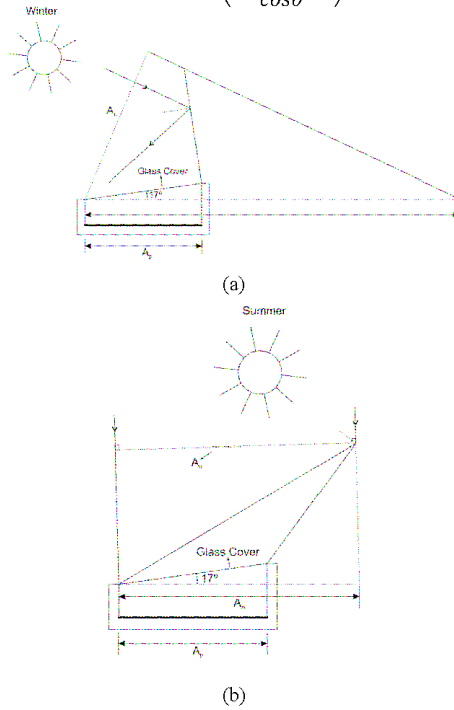


Figure 3 - Solar cooker: (a) – Tested in winter; (b) – Tested in summer.

And F_2 by

$$F_2 = \eta'_0 \times C_r = F_1 \times \frac{(MC)_w}{A' \times \tau} \times \ln \left[\frac{\left(1 - A_p \times \left(\frac{T_{w1} - T_a}{A' \times F_1 \times I_h} \right) \right)}{\left(1 - A_p \times \left(\frac{T_{w2} - T_a}{A' \times F_1 \times I_h} \right) \right)} \right] \quad (4)$$

Time to boiling is calculated according to

$$\tau_0 = -\frac{F_1}{F_2} \times \frac{(MC)_w}{A'} \times \ln \left[1 - \frac{A_p \times (99.21 - T_a)}{A' \times F_1 \times I_h} \right] \quad (5)$$

Where, η_0 is the optical efficiency, U_L the heat loss factor, T_{ps} the plate temperature at stagnation, T_{air} the ambient temperature at stagnation, A_p plate area, I_{hs} irradiance on horizontal plane at stagnation, A_c is the cover area, A_n normal area to incoming beam irradiation, Θ the zenith angle, δ the mirror tilt, ρ the mirror reflectivity, A_H projected area by the lid on the horizontal plane (see Figure 3), $(MC)_w$ is the product between mass of water and its specific heat capacity, τ time between T_{w1} and T_{w2} , T_{w1} initial water temperature value (40°C), T_{w2} final water temperature value (80°C), T_a average ambient temperature and I_h average insolation on a horizontal plane between T_{w1} and T_{w2} .

With $A_n = 0,244 \text{ m}^2$, $A' = 0,458 \text{ m}^2$ for SUNTASTE COMPACT and $A_n = 0,318 \text{ m}^2$, $A' = 0,597 \text{ m}^2$ for LARGE, the results are as follows. $(MC)_w$ was calculated according to $(MC)_{wCOMPACT} = 1.463 \text{ kg} \times 4186 \text{ J/kg.K}$ and to $(MC)_{wLARGE} = 1.911 \text{ kg} \times 4186 \text{ J/kg.K}$.

Table 4 - Figure of merit F_1 .

SUNTASTE	F_1 (m ² K/W)
COMPACT	0,054
LARGE	0,052

Fig. 4 shows the rise in plate temperature and Fig. 5 shows the water temperature. Testing was carried out in the middle of November, during high DNI days.

Analyzing Fig. 4, it can be seen that, the plate stagnation temperature is 131°C and 137 °C for COMPACT and LARGE SUNTASTE, respectively. It is to be noted that during the tests in plate stagnation temperature the sun was very low in the sky ($\Theta = 57.48^\circ$).

¹ Boiling water temperature at the place where the tests carried out [10].

² According to [11], the water mass M obtained considering 6 kg/m² of A_n .

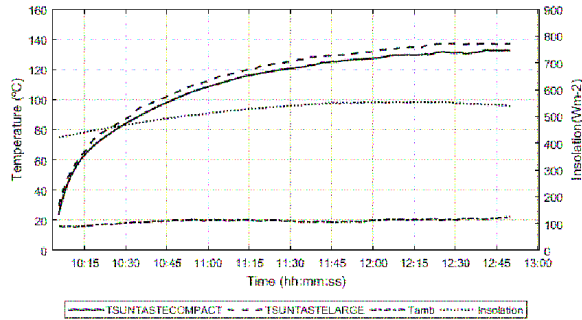


Figure 4 - Rise in plate temperature with tracking every 15min (November 15th).

Table 5 – Figure of merit F_2 and boiling time of water for the testing day.

SUNTASTE	F_2	τ_0 (min)
COMPACT	0,096	129
LARGE	0,092	157

According to the measurements (Fig. 5), the time for water to go from ambient temperature to boiling are 145 and 177 minutes for SUNTASTE COMPACT and LARGE, respectively. These values are not so distant from τ_0 presented in table 5, but they are not quite the same because during the test initial water temperatures in both SUNTASTE were higher than ambient temperature. As in the test quoted earlier, the sun was very low in the sky ($\Theta = 58.67^\circ$), thus the incoming irradiance was close to the minimum in a sunny in our latitude.

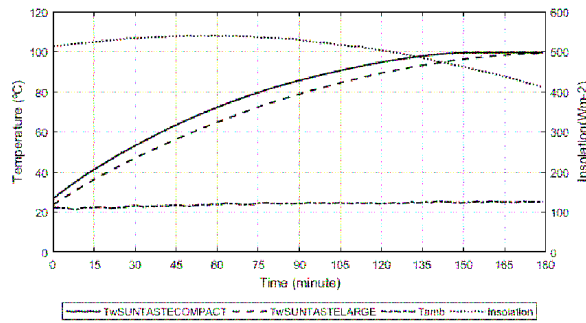


Figure 5 - Rise in water temperature with tracking every 15min (November 16th).

4. CONCLUSIONS

The test of solar box cookers is an extremely important issue, since it allows to evaluate their performance, as well as to relate cost/benefit between different alternatives, according to the needs of the users.

The use of non-imaging optics enables higher temperatures and, in turn, higher performance. It does not require sophisticated solar tracking, so SUNTASTE can be used without user intervention.

Although the tests were carried out in November, it can be seen that the SUNTASTE solar cookers reached still high stagnation absorber/plate temperature and are close to SUNCOOK stagnation plate temperature. Regarding tests with water, the time the water takes to go from ambient temperature to the local boiling temperature (99.2 °C) is over two hours, 146 minutes and 177 minutes, for SUNTASTE COMPACT and LARGER, respectively.

It was clearly confirmed that the tilted glass cover on the SUNTASTE greatly reduces the condensation formation on the interior side of the cover, providing better transparency of the cover and thus transmission of incoming sunlight.

5. REFERENCES

- [1] Collares Pereira M, Almeida JP, Oliveira JC. Description and testing of a novel solar box type cooker incorporating CPC type optics. ISES Solar World Congress, Goteborg, Sweden, 2003.
- [2] Suntaste Specifications, SunOK, LDA. <http://www.sunok.eu/home/products/suntaste/details>, accessed on 2017.12.07.
- [3] BIS – Bureau of Indian Standards- second revision of IS, 13429 (part 1) – Solar Cooker-Box type- specification, Part 1-Requirements.
- [4] Collares Pereira M, Cavaco A, Tavares A. Figures of merit and their relevance in the context of a standard testing and performance comparison methods for solar box- cookers, Submitted to Solar Energy, on December 08th, 2017.
- [5] M. Telkes. Solar Cooking Ovens, Solar Energy, 1959, 3: 1-11.
- [6] Solar Cooker International, <http://www.solarcookers.org/index.php>, accessed on 2017.12.07.
- [7] Roland Winston. Nonimaging Optics, Academic Press, 2004.
- [8] SUNCOOK, <http://www.sunok.eu/home/products/sun-cook>, accessed on 2017.12.07.
- [9] IBEROMOLDES, <http://www.iberomoldes.pt/>, accessed on 2017.12.07.
- [10] Boiling point of water and altitude, https://www.engineeringtoolbox.com/boiling-points-water-altitude-d_1344.html, accessed on 2017.12.07.
- [11] De Castell ME, Pastrana AF, Collares Pereira M, Vázquez L, Esteves A. Propuesta de procedimiento para la evaluación del comportamiento térmico de cocinas y hornos solares, *Averma* vol. 3,133-5, 1999.

Anexo 7: Participação na *paper* publicado na *solar energy*.

Solar Energy 166 (2018) 21–27



Contents lists available at ScienceDirect

Solar Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/solener



Review

Figures of merit and their relevance in the context of a standard testing and performance comparison methods for solar box – Cookers



Manuel Collares-Pereira^{a,b}, Afonso Cavaco^{a,b,4}, Ailton Tavares^a

^a Renewable Energies Chair, University of Évora, IIFA, Largo Marquês de Marialva, 7002-554 Évora, Portugal

^b Portuguese Solar Energy Institute, IPES, Largo Marquês de Marialva, 7002-554 Évora, Portugal

ARTICLE INFO

Keywords:

Solar box cooker
Standards for testing solar cookers
Figures of merit

ABSTRACT

Solar cookers, in particular solar box cookers, are becoming more popular and widespread. New ideas, manufacturing techniques and higher performance designs are being proposed. As usual, a good testing standard is an important tool for the market and for cooker acceptance from the users. In the past, testing procedures and figures of merit have been proposed [1–5] for cooker characterization. These have several limitations that can be eliminated with a deeper analysis of solar box cooker optical a thermal behavior. This paper proposes a revision of these procedures yielding more meaningful and useful Figures of Merit. This work can be a first step towards a future and more precise testing standard. This revision is formulated keeping an important characteristic of the existing proposals: simple and available instrumentation allowing these tests to be carried anywhere in the World, with a minimum of investment and/or lab conditions.

1. Introduction

In Mullick et al. (1987, 1996) the authors proposed a way towards the testing of solar cookers and extracted from the testing results two figures of merit, F_1 and F_2 , to help in the comparison of different cookers performance.

F_1 is a figure of merit related with the fact that for proper cooking, the cooker must provide temperatures above the boiling point of water and F_2 is related to the way the cooker handles the sensible heating of the load. Other important definitions for cooker characterization and comparison are power delivered, cooker efficiency, etc. (Punk, 1999; Punk, 1998).

These figures of merit have become a part of the standard for testing of Box Cookers, proposed by BIS. These definitions should take into account that there are many different box type cooker geometries, with and without performance augmenting reflecting lids.

However, in BIS, the proposed standard demands that all augmenting mirrors be covered by a black cloth during testing and thus, in fact, the tests are carried out over the box only! Their usefulness is thus very limited and the proposed application of the resulting F_1 and F_2 for the calculation of a parameter like time to reach boiling is rather meaningless, since the cooker will normally operate with its augmenting mirrors and that time will certainly be shorter. Even the text of the standard acknowledges that. In fact, the authors in Mullick et al. (1987) were well aware (and even comment about it) that their

definition was set as if augmenting mirrors did not exist.

Later, other authors in De Castell et al. (1999) discussed and extended the ideas of the first proposals for these figures of merit in an attempt at refining/correcting at least some of the shortcomings of the first definitions, by recognizing the presence of augmenting mirrors and different possible geometries, with and without concentration. However, their proposal does still not take fully advantage of a more accurate way for taking into account the cooker's characteristics.

In any case, the present situation is disturbing since not only researchers are using different definitions but also these are not really as precise as they could be. That hinders their application either to fully characterize any box cooker (Geddani et al., 2014), predict boiling time, determine optimal cooking loads (Mahavar et al., 2015), determine heat loss and optical efficiency (as for instance in Mullick et al. (1991)).

This paper proposes new definitions for F_1 and F_2 which go a step further from the proposals in De Castell et al. (1999), by taking into account the optical behavior of the lid augmenting mirror without requiring irradiation measurements other than on the horizontal plane.

In fact, a true merit of the very first proposals (Mullick et al., 1987; Mullick et al., 1996; BIS) is that only simple measurements are required for the characterization being sought, in contrast with a possible list of more demanding ones, which would perhaps better characterize each individual box-cooker, but might be quite difficult to transform into a procedure to be used everywhere in the same way and with good but

* Corresponding author at: Portuguese Solar Energy Institute, IPES, IIFA, Largo Marquês de Marialva, 7002-554 Évora, Portugal.
E-mail address: afonso.cavaco@ipes.pt (A. Cavaco).

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.040>

Received 7 December 2017; Received in revised form 13 March 2018; Accepted 14 March 2018
0038-092X/© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Nomenclature			
Acronyms			
BIS	Bureau of Indian Standards	A_n	normal area to incoming beam irradiation
CPC	Compound Parabolic Concentrator	A_p	plate area
Greek symbols		A_{E1}	projected area by the lid on the horizontal plane of the cover
δ	solar declination	F_1	figure of merit 1
η_0	optical efficiency	F_{1new}	new figure of merit 1
θ	zenith angle	F_2	figure of merit 2
λ	local latitude	F_{2new}	new figure of merit 2
ρ	mirror reflectivity	I_c	collected solar irradiance
τ	time between T_{w1} and T_{w2}	I_h	solar irradiance on horizontal plane
τ_0	water boiling time	$(MC)_w$	product between mass of water and specific heat capacity of water
τ_{0new}	new water boil time	$(MC)'_w$	product between mass of water and specific heat capacity of all system (water, pot and cooker interiors)
ω_c	solar time angle	P	power
Roman symbols		T_{air}	ambient temperature
A_c	horizontal transparent cover area	T_p	absorber (plate) temperature
		T_{ps}	absorber (plate) temperature at stagnation
		T_{w1}	initial water temperature
		T_{w2}	final water temperature
		U_L	heat loss coefficient

not expensive instrumentation.

A future standard will certainly benefit from these more precise definitions but must still be very careful at defining testing conditions that will resolve ambiguities in the results as consequence, for instance, of the time of the year of the testing, the load to be used, the extent and use of pre-heating, etc. This discussion is not the objective of this paper.

This paper derives and proposes adjustments to the definitions of the existing figures of merit, with the goal of contributing to a future standard testing procedure and performance comparison method for solar box – cookers.

2. Basic definitions

2.1. The problem

Consider a box cooker, just as the one in Fig. 1.

The work described in Mullick et al. (1987) proposes two figures of merit, F_1 and F_2 . For the sake of the discussion that follows, a brief derivation of these figures of merit is presented just as made in Mullick et al. (1987).

Considering A_c as the horizontal transparent cover area and I_h as the irradiance on the horizontal plane (in this case coincident with the irradiance on the horizontal transparent cover to the cooker).

F_1 is obtained from a thermal performance equation describing the empty cooker's performance, by stating that the power being delivered by the cooker (the reflecting lid, if it exists, is considered to be covered by a black cloth) is as in Eq. (1)

$$P = A_c \times I_h \times \eta_0 - A_c \times U_L \times (T_p - T_{air}) \quad (1)$$

where

U_L represents the cooker heat loss factor referred to the cover area A_c ;

η_0 the optical efficiency of the cooker;

T_p the absorber (plate) temperature of the empty cooker and T_{air} the ambient temperature.

At stagnation T_p becomes T_{ps} (maximum absorber temperature) and the power to be extracted is zero. Hence

$$A_c \times I_h \times \eta_0 = A_c \times U_L \times (T_{ps} - T_{air}) \quad (2)$$

And F_1 appears defined as

$$F_1 = \frac{\eta_0}{U_L} = \frac{(T_{ps} - T_{air})}{I_h} \quad (3)$$

The problem with this definition is that the cover area (A_c) may not characterize the cooker by itself: usually there may be an augmenting lid (see Fig. 1), intercepting solar irradiation and changing the cooker's performance; an infinite variety of cookers could correspond to the same cover area (A_c). Besides, the cover may not be horizontal (see Fig. 2) and such a definition does not even take into account that specificity.

The other Figure of Merit, F_2 , arises in the context of loading the cooker with a certain quantity of food (represented by a certain quantity of water for the sake of the testing) and measuring the heating time associated with it.

Let $(MC)_w$ be the mass times the specific heat of the water being heated by the cooker; τ is the time, in seconds, it takes the water (standing for a cooking load) to go from T_{w1} to T_{w2} and again T_{air} is the average ambient temperature during testing.

The equations leading into the definition of F_2 are the following:

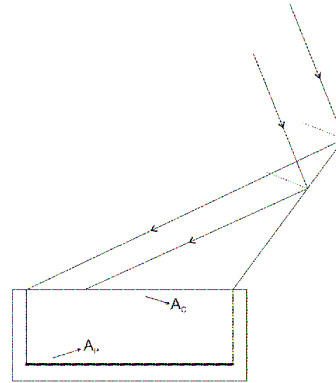


Fig. 1. A typical box cooker with a horizontal transparent cover and an augmenting lid.

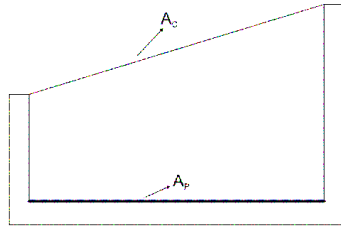


Fig. 2. Box cooker with a tilted transparent cover.

$$dQ = (MC)'dT_w \quad (4)$$

where (MC)' stands for the overall relevant cooker and utensils heat capacity, including the water load to be heated (MC)_w (i.e. (MC)' = (MC)_o + (MC)_w)

but P, as in (1), is $P = \frac{dQ}{dt}$, hence

$$dt = \frac{(MC)'}{P} \times dT_w \quad (5)$$

Assuming that water is heated from a certain temperature T_{w1} at time t₁ to T_{w2} at a time t₂ (τ = t₂ - t₁), while I_h and T_{air} remain constant, it is possible to obtain, integrating between t₁ and t₂, the boiling time as

$$\tau = -F_1 \frac{(MC)'}{A_c \eta_0} \times \ln \left[\frac{I_h - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{w2} - T_{air}}{h} \right)}{I_h - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{w1} - T_{air}}{h} \right)} \right] \quad (6)$$

defining now $C_r = \frac{(MC)_w}{(MC)'}$

it is possible to write the second figure of merit (F₂) as

$$F_2 = \eta_0 \times C_r \times F_1 \times \frac{(MC)_w}{A_c \tau} \ln \left[\frac{1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{w1} - T_{air}}{h} \right)}{1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{w2} - T_{air}}{h} \right)} \right] \quad (7)$$

This definition suffers from the same limitations as referred with respect to F₁ above. However, both have the merit of requiring very simple measurements to be obtained. The question is: how well do they really characterize the cooker?

There is a further and very important set of remarks:

- (1) Testing must establish a standard way to choose (MC)_w, since F₂ depends on it;
- (2) There is an ambiguity associated with the time of the year in which the testing is done.

To see how, consider Figs. 3 and 4 where the same cooker is tested in winter and in summer time.

In what follows the nomenclature A is used to refer all areas, however in the figures drawn it appears as a length. This is because the width of the box cooker (out of the plane of the paper and perpendicular to it) is a fixed multiplying value.

The angle of the lid in each situation is such that its edge reflects the maximum possible beam irradiation up to the cooker (edge of cover A). This defines an acceptance irradiation area (perpendicular to incident beam radiation), A_n, which is larger in summer than in winter. This means that (T_{ps} - T_{air}) will likely be higher in summer than in winter and thus both F₁ and F₂ are expected to be different.

2.2. Contribution to solving the problem

Consider A_n (see Figs. 3 and 4), on a plane perpendicular to the

incoming beam irradiation, as the area corresponding to the irradiation being collected by the box cooker. Thus A_n × I_c, where I_c is the sum of beam, diffuse and ground reflected irradiation on that plane, i.e. it is the irradiation that would be measured by a pyranometer placed on that plane.

Take A_H as the area projected by the lid on the horizontal plane, containing A_c (see Figs. 3 and 4) or its lowest point, in the case of it being tilted

In fact

$$A_n = A_H \times \cos\theta \quad (8)$$

where θ is the angle the incident beam radiation makes with the normal at the testing site at solar noon.

From Duffie and Beckman (1980),

$$\cos\theta = \cos\lambda \times \cos\delta \times \cos\omega t + \sin\delta \times \sin\lambda \quad (9)$$

where λ is the local latitude, δ is the solar declination for each testing day and ωt the angle corresponding to the solar time (ωt = 0 being the value at solar noon)

The next step will be to write Eq. (1) as to better reflect the behavior of the cooker, since with the definitions cited before it really does not.

Delivered power should really more accurately be written as

$$P = A_n \times I_c \times \eta_0 - A_p \times U_L \times (T_p - T_{air}) \quad (10)$$

A_p is now used, rather than A_c, with U_L now referred to the plate (absorber) area rather than to the cover area, for a more precise physical meaning, which is related to the extent solar irradiation is being concentrated.

The term A_n × I_c might be difficult to measure and thus we propose an approximation which is good enough and easy to measure

$$A_n \times I_c \sim A_H \times I_h \quad (11)$$

The term η₀ can be made more explicit by considering irradiation incident on the cover, with and without reflection on the lid mirror. So, Eq. (10) can now be written again, acknowledging this explicit presence of an augmenting cover lid (note: side mirrors, can be ignored at this stage, since the cooker tends to be tested with the sun in (or very near) the cooker's symmetry plane).

$$P = I_c \times [A_c \times \cos\theta + (A_n/\cos\theta - A_c) \times \rho \times \cos\theta] \times \eta'_0 - A_p \times U_L \times (T_p - T_{air}) \quad (12)$$

Using Eq. (12) one now has

$$P = I_h \times A' \times \eta'_0 - A_p \times U_L \times (T_p - T_{air}) \quad (13)$$

where

$$A' = [A_c + (A_n/\cos\theta - A_c) \times \rho] \quad (14)$$

Hence it is now possible to define F_{1new} and F_{2new}, just like before

$$F_{1new} = \frac{\eta'_0}{U_L} = \frac{A_p (T_{ps} - T_{air})}{A' I_h} \quad (15)$$

and

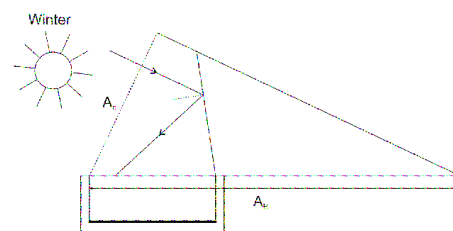


Fig. 3. Box cooker being tested in winter.

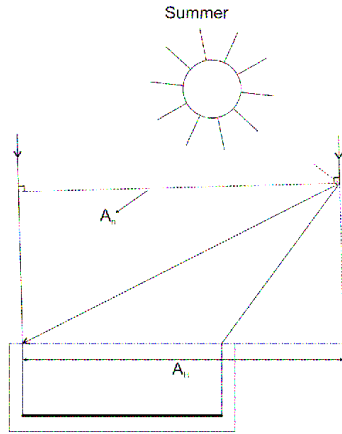


Fig. 4. Box cooker being tested in summer.

$$F_{2new} = \eta'_0 \times C_r = F_1 \times \frac{(MC)_w}{A' \times \tau} \times \ln \left[\frac{\left(1 - A_p \times \left(\frac{T_{w2} - T_{air}}{A' \times F_{1new} \times h_r} \right) \right)}{\left(1 - A_p \times \left(\frac{T_{w1} - T_{air}}{A' \times F_{1new} \times h_r} \right) \right)} \right] \quad (16)$$

3. Application

3.1. Tests with the SUNCOOK

In Collares Pereira et al. (2003) the SUNCOOK was presented and discussed, a solar box-cooker with augmenting lid mirror and a box made with a double cover and inside mirrors of the asymmetric CPC type, a very favorable combination of concepts: ideal concentration (Winston, 2004) in a simple box type configuration.

Fig. 5 shows an image of the SUNCOOK, box close and another of the SUNCOOK with the lid open and its booster mirror deployed.

Fig. 6 shows two cross sections of the box, with their respective asymmetric CPC walls (see Collares Pereira et al., 2003 for a full description).

Testing the SUNCOOK according with BIS grossly misrepresents the behavior of this cooker, as will be shown below.

Plate stagnation temperature was measured for a few days, from September to November. The results can be seen below, for several clear days. I_h is also presented in Table 1 below, on average, for the duration of the test. Measurements were made on the same cooker, with the lid and its booster mirror deployed properly and with the lid covered by a black cloth.

It can be seen that the results are quite different, with and without the mirror. In particular, even with the sun very low in the sky, with the lid properly tilted, the plate temperature is still quite high in mid-November (148 °C). However, with the cloth on, at the same time, it is no longer possible to boil water, since plate temperature is below 100 °C.

For the purpose of calculating F_1 , F_2 and F_{1new} , F_{2new} , the results obtained around November 15 were used.

These results were obtained for this paper with a SUNCOOK, following all the recommendations in BIS in terms of cooker orientation and cooker pre-heating. However, the choice of $(MC)_w$ was done differently, rather following the recommendation in De Castell et al. (1999) as they refer to A_n and not to A_c . The higher value of 8 kg/m² proposed in BIS is referred to A_c cover area, smaller than A_n , and thus, on average, the difference is not so large.

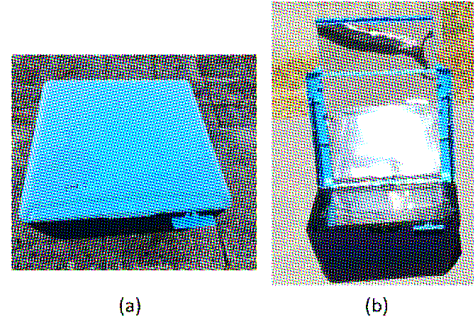


Fig. 5. the SUNCOOK: (a) – closed box; (b) – lid open with booster mirror.

Fig. 7 shows specific data for November 16th, including that of solar radiation during the testing hours (no black cloth).

Fig. 8 shows the data obtained for an identical SUNCOOK with the black cloth covering the lid.

Table 2 shows the relevant data for the calculation of the coefficients of merit, for the testing day.

In Table 3 results are presented for F_1 , F_2 , F_{1new} , F_{2new} , according to Eqs. (3), (7), (15), and (16) respectively.

The test starts with the water at $T_{W1} = 40$ °C and $T_{W2} = 80$ °C is the temperature to be reached for the evaluation of F_2 . The no cloth case is shown in Fig. 5 and the measurements with the cloth in Fig. 6.

It can be seen that covering the mirror with a cloth did not allow the water to reach 80 °C (in fact no more than 74 °C), therefore F_2 cannot even be determined.

It can also be observed that the testing with cloth did not even let the cooker reach the minimum admissible temperature as referred in Mallick et al. (1987), where F_1 values above 0.12 are indicated as desirable.

As derived for Eq. (6), it is possible to write (Eq. (17))

$$\tau = -F_{1new} \frac{(MC)_w}{A' \eta'_0} \times \ln \left[\frac{\left(h_r - A_p \times \left(\frac{T_{w2} - T_{air}}{A' \times F_{1new} \times h_r} \right) \right)}{\left(h_r - A_p \times \left(\frac{T_{w1} - T_{air}}{A' \times F_{1new} \times h_r} \right) \right)} \right] \quad (17)$$

τ being the time it takes water to go from T_{w1} to T_{w2} .

This equation can be used to calculate the expected time for the cooker to reach boiling (i.e. to go from ambient temperature to near 100 °C) for different climatic conditions, i.e. pending only on I_h and T_{air} .

This can now be written as Eq. (18)

$$\tau_{0new} = -\frac{F_{1new}}{F_{2new}} \times \frac{(MC)_w}{A'} \times \ln \left(1 - \frac{A_p \times (99.2 - T_{air})}{A' \times F_{1new} \times h_r} \right) \quad (18)$$

Fig. 9 corresponds to data obtained on November 20th with the SUNCOOK tested with water from ambient temperature to boiling with the proper $(MC)_w = 1917$ kg × 4186 J/kgK for that day.

The time to boiling was calculated according to eq. 18 and the result was $\tau_{0new} = 132$ min.

This result compares very well with the result that can be obtained from Fig. 9, around 135 min.

3.2. Can these figures of merit be used in other times of the year?

It was mentioned above that it is important to address the issue of the usefulness of these figures of merit in connection with the moment

¹ 99.2 °C is boiling water temperature at the measurement site (height above sea level – 253 m)

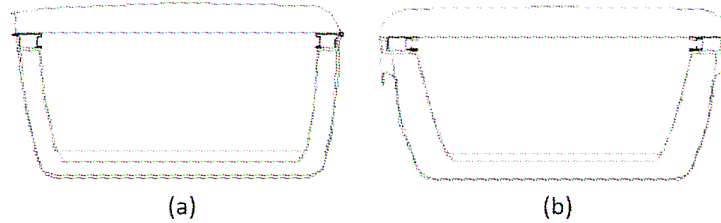


Fig. 6. (a) Front and back and (b) Left and right.

Table 1
Stagnation temperature measurements with the SUNCOOK, several different days.

SUNCOOK (lid and booster)	25/09/2017	26/09/2017	23/10/2017	15/11/2017
T_{pe} (°C)	171	174	160	148
I_n (W/m ²)	805	798	644	553
SUNCOOK with black cloth	02/10/2017	03/10/2017	04/10/2017	06/11/2017
T_{pe} (°C)	115	126	120	92
I_n (W/m ²)	750	739	759	598

In fact, for future standards, a new figure of merit allowing for meaningful solar box cooker comparisons, could well be “time to boiling” calculated with F_{1new} and F_{2new} measured as above, at whatever time of the year. This new figure of merit, $F_{time\ to\ boiling}$ would be calculated in some standard conditions according to Eq. (18). This possibility will be the objective of future study.

Obviously, this result and these conjectures could not be reached with F_1 and F_2 as defined in Müllick et al. (1987, 1996). In this case F_2 could not even be measured in November.

4. Conclusion

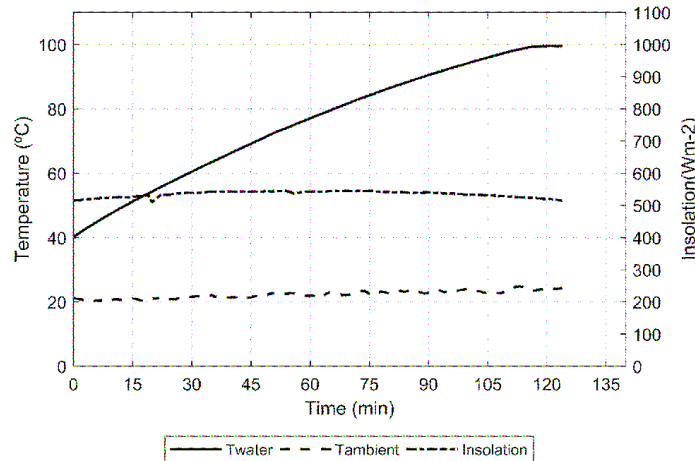


Fig. 7. Rise in water temperature with tracking (November 16th) every 15 min, with no cloth over the lid.

of the year (season) the measurements are made.

This is an interesting issue and will be the subject of another paper, with measurements made at different times of the year.

However, it is already possible to make an evaluation, since results were obtained from measurements of the same SUNCOOK and reported in Collares Pereira et al. (2003). These took place in May. Then the same time from ambient to boiling was measured to be 120 min, for the $(MC)_w$ of 2.5 kg and $I_h = 943\text{ W/m}^2$, $A' = 0.441\text{ m}^2$.

Using F_{1new} and F_{2new} as reported in Table 2, Eq. (18) would yield 119 min, a very close estimate to the result in Collares Pereira et al. (2003), hinting at the possibility that if the values F_{1new} and F_{2new} are to be measured at the same time of the year and used together in these equations, they have a predictive power which is good enough for any time of the year.

An internationally accepted standard testing of solar box cookers is quite important to allow for a fair comparison between cookers and a fair evaluation of performance vs cost, but it does not yet exist as such.

A standard procedure has been proposed in India (BIS) but it treats cookers in a simplified way (leaving out the performance induced by augmenting mirrors, like the reflecting lid, for instance, or the fact that the cooker might be a concentrator), therefore yielding inaccurate/ambiguous results at best, often unable to predict simple parameters like time between ambient temperature and boiling temperature.

However, it is recognized as being a very interesting feature that all measurements required are simple and use widely available instrumentation, a feature that it is important to preserve in any future standard, to allow for cooker testing anywhere in the World with reasonable costs and accuracy.

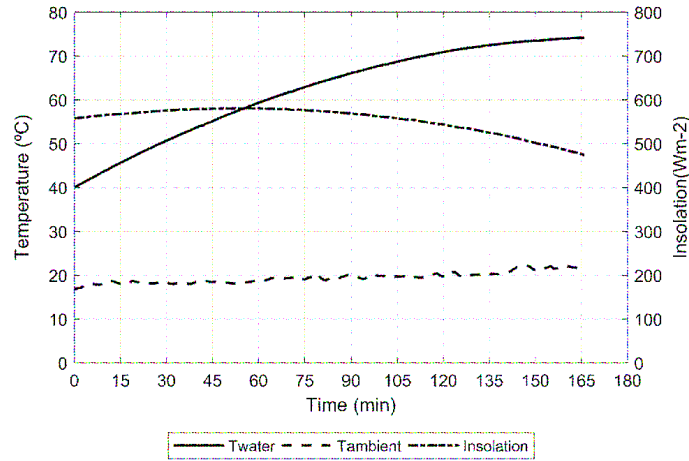


Fig. 8. Rise in water temperature with tracking (November 16th) every 15 min, with cloth over the lid.

Table 2

Relevant data for the calculation of the coefficients of merit, for the testing day.

Data	θ (°)	Width (m)	A_c (m ²)	A_p (m ²)	A_n for the testing period (m ²)	(MC) _w (J/K)
SUNCOOK (lid and booster)	57.72	0.455	$0.455 \times 0.460 = 0.21$	$0.350 \times 0.410 = 0.1435$	0.327	$1.961^1 \times 4186 = 8170$

¹ From 6 kg/m² referred to A_n .

Table 3

F_1 , F_2 , F_{1new} , F_{2new} from measurements on November 16th.

Procedure	F_1 , F_{1new}	F_2 , F_{2new}
With cloth over lid mirror (as in BIS)	0.118	n.a. (80 °C not reached!)
New proposal	0.055	0.092

The BIS proposal rests, among others, on the calculation of two Figures of Merit, F_1 and F_2 . F_1 is a figure of merit related with the fact that for proper cooking the cooker must provide temperatures above the boiling point of water and F_2 is related to the way the cooker handles the sensible heating of the load. A more precise proposal for these figures of merit was made in De Castell et al. (1999). There, the

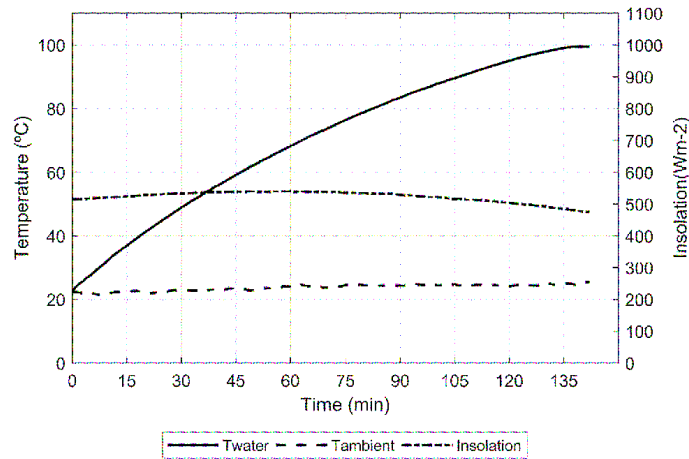


Fig. 9. rise in water temperature with tracking every 15 min and no cloth over the lid on November 20th.

authors already treat the solar box cooker complete with augmenting (lid) mirrors and their F_1 and F_2 figures of merit, keeping in line with the requirement of using the same simple measurements and widely available instrumentation. However, it is possible to go one step further in characterizing more precisely cooker behavior as shown in this paper.

The work presented in this paper explains the new proposal and compares it with the previous and simpler BIS proposal.

It then applies the results obtained to a particular cooker reported in Collares Pereira et al. (2003) and shows the capacity prediction of something like time to boiling. The results obtained with the new proposal made were shown to be well in line with the measurements made and even to be capable of reproducing this result measured at other times of the year. A proposal was made to consider, in future standards, the possibility of transforming “time to boiling” in a new figure of merit with real power to be meaningful in the comparison of several box cookers.

In view of the results obtained, the authors recommend that a future standard uses the figures of merit as defined here.

For a new standard to be fully developed, many specific circumstances must still be defined, as apparent in BIS and De Castell et al. (1999). The present work did not attempt at contributing to these definitions, a discussion which would certainly have to involve different experts in this area and also representatives of solar cooker manufacturing companies. In the meanwhile, the definitions and recommendations made here seem to be an adequate follow up from BIS and De Castell et al. (1999) and can integrate a useful and more precise future standard.

In the future the authors plan to contribute further to the definition of a revised testing procedure. Among other aspects they plan to address the broad question of time of the year influence in testing box cookers.

References

- BIS – Bureau of Indian Standards- Second Revision of IS, 13429 (part 1) – Solar Cooker- Box Type- Specification, Part 1- Requirements.
- Collares Pereira, M., Almeida, J.P., Correia de Oliveira, J., 2003. Description and testing of a novel solar box type cooker incorporating CPC type optics. ISES Solar World Congress, Göteborg.
- De Castell, M.E., Finck, Pastrana A., Collares, Pereira M., Vázquez, L., Esteves, A., 1999. Propuesta de procedimiento para la evaluación del comportamiento térmico de cocinas y hornos solares. *Averna* 3 (2), 133–135.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1980. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley, New York.
- Finck, Paul A., 1998. Parametric model of solar cooker performance. *Sol. Energy* 62 (1), 63–65.
- Finck, Paul A., 1999. Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance. *Sol. Energy* 68 (1), 1–7.
- Góddam, Sunil, Dinesh, G. Kumasavel, Sivasankar, Thirugnanasambandam, 2014. Determination of thermal performance of a box type solar cooker. *Sol. Energy* 113, 324–331.
- Mahavar, S., Rajawar, P., Punia, R.C., Sengar, N., Dashora, P., 2015. Evaluating the optimum load range for box type solar cookers. *Renewable Energy* 74, 187–194.
- Mullick, S.C., Kandpal, T.C., Sorensen, A.K., 1987. Thermal test procedure for box-type solar cookers. *Sol. Energy* 39 (4), 353–366.
- Mullick, S.C., Kandpal, T.C., Kumar, Subodh., 1981. Thermal test procedure for a parabolic concentrator solar cooker. *Sol. Energy* 46 (3), 139–144.
- Mullick, S.C., Kandpal, T.C., Kumar, Subodh., 1996. Testing of box-type solar cooker: second figure of merit (τ_2) and its variation with load and number of pots. *Sol. Energy* 57 (5), 409–413.
- Winston, Roland, 2004. *Nonimaging Optics*. Academic Press.