



UNIVERSIDADE DE ÉVORA
ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Desenvolvimento e operação de um circuito de ensaios de coletores solares térmicos a óleo. Comparação com os resultados obtidos num circuito a água.

Afonso Manuel Dias Cavaco

Orientação: Professor Doutor Manuel Collares Pereira

Mestrado em Engenharia da Energia Solar
Dissertação

Évora, 2014

Esta dissertação não inclui as críticas e as sugestões feitas pelo júri



UNIVERSIDADE DE ÉVORA
ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Desenvolvimento e operação de um circuito de ensaios de coletores solares térmicos a óleo. Comparação com os resultados obtidos num circuito a água.

Afonso Manuel Dias Cavaco

Orientação: Professor Doutor Manuel Collares Pereira

Mestrado em Engenharia da Energia Solar
Dissertação

Évora, 2014

Esta dissertação não inclui as críticas e as sugestões feitas pelo júri

Agradecimentos

Este espaço é dedicado àqueles que, de alguma forma, contribuíram para que esta dissertação fosse realizada. Não sendo viável nomeá-los a todos, há no entanto alguns a quem não posso deixar de manifestar o meu apreço e agradecimento sincero.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Manuel Collares Pereira, pela forma como orientou o meu trabalho. Destaco o seu otimismo, estímulo, disponibilidade em ajudar e recomendações dadas, permitindo o desenvolvimento deste trabalho com motivação e desenvolvimento dos meus conhecimentos.

Deixo o meu agradecimento a todos colaboradores da Cátedra BES – Energias Renováveis pela forma cordial como me receberam e trataram, em especial ao João Marchã por todo otimismo, motivação e apoio no desenvolvimento desta dissertação. Agradeço ainda ao Tiago Osório pela sua partilha de conhecimentos e disponibilidade em ajudar.

Por fim, gostaria de deixar o meu agradecimento à minha família e namorada por todo apoio, compreensão, confiança e motivação dada e, em especial aos meus pais, pela possibilidade de prosseguir os meus estudos.

Resumo

Os fluidos térmicos de transferência de calor (FTQ) usados em coletores solares térmicos tendem a degradar-se e envelhecer [1], afetando o seu desempenho em sistemas de aquecimento, como coletores solares térmicos. O ensaio destes depende duma medição precisa do caudal e calor específico do FTQ. Pela calorimetria, obtém-se a medição do produto do calor específico do fluido pelo caudal de operação do FTQ, medindo-se, com a necessária precisão o rendimento de coletores solares térmicos operando a óleo.

Recolheram-se e analisaram-se dados para medição do rendimento de um circuito de ensaios a óleo de coletores solares térmicos do tipo CPC, comparando e compatibilizando os dados obtidos, com os recolhidos para um circuito a água. Compararam-se os dados obtidos até 90°C, validando-os com o circuito a óleo, assegurando-se um grau de confiança compatível com a norma de ensaio de coletores, EN 12975-2:2006 [2], para a faixa de temperaturas de ensaio acima de 100°C.

Abstract

Development and operation of a testing loop for thermal solar collectors using oil. Comparison with the results obtained with a water loop.

Thermal heat transfer fluids (HTF) used in thermal solar collectors are known to age and degrade [1], affecting their performance in heating systems such as thermal solar collectors. Collector testing depends on a precise measurement of flow rate and specific heat of HTF. By calorimetry, the product of the specific heat by the flow rate of HTF is obtained, therefore the efficiency of thermal solar collectors using oil is measured with necessary accuracy.

Data for measuring the efficiency of a testing circuit of thermal solar collectors of CPC type using oil was collected and analysed, compared and conciliated with data obtained in a water loop. Data collected up to 90°C was compared, being validated with oil tests, ensuring a degree of confidence compliant with test collectors regulation, EN 12975-2:2006, for the range of test temperatures above 100°C.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Lista de Quadros.....	vi
Lista de figuras.....	viii
Nomenclatura.....	xi
Lista de abreviaturas	xiv
1. Objetivo	1
2. Introdução	2
2.1. Energia Solar	2
2.2. Ângulos Solares.....	4
2.2.1. Declinação solar, δ	5
2.2.2. Ângulo Horário, h	7
2.2.3. Ângulo da Altitude Solar, α	7
2.2.4. Ângulo Solar Azimutal, z	8
2.2.5. Ângulo de Incidência, Θ	9
2.2.6. Ângulo de incidência para superfícies em movimento	10
2.3. Calorimetria	17
2.3.1. Calorímetro.....	17
2.4. Coletores Solares Térmicos.....	20
2.4.1. Concentradores solares térmicos do tipo CPC	22
2.4.2. Desempenho de coletores solares térmicos	24
2.5. Norma de ensaio de coletores solares térmicos	29
3. Banco de Ensaio	30
3.1. Circuito Hidráulico	30
3.1.1. Características dos circuitos e da plataforma de ensaios	32
3.2. Circuito de potência e controlo	34
3.2.1. Calibração de sondas de temperatura	35
3.2.2. Calibração de resistência equivalente para medição de corrente elétrica.....	36
3.2.3. Determinação do fator de calibração do calorímetro.....	38
3.2.4. Controlo da temperatura do FTQ.....	40
4. Programação desenvolvida	42
5. Especificações e procedimento de ensaio	44

5.1. Especificações técnicas	44
5.2. Procedimento de ensaio	47
6. Resultados	50
7. Conclusões.....	57
8. Bibliografia.....	60
9. Anexos	61
9.1. Anexo 1	61
9.2. Anexo 2	62
9.3. Anexo 3	63
9.4. Anexo 4	64
9.5. Anexo 5	65

Lista de Quadros

Quadro 1 - Recursos renováveis existentes e respetiva taxa de exploração, [4].....	3
Quadro 2 - Dia central de cada mês, [5].....	7
Quadro 3 - Comparação da energia recebida para os vários modos de seguimento, [5].	16
Quadro 4 - Quadro resumo dos equipamentos instalados em cada circuito	32
Quadro 5 - Temperatura e fluxo máximo do FTQ para cada circuito hidráulico	32
Quadro 6 - Características do coletor solar térmico do tipo CPC ensaiado [15], [16]	33
Quadro 7 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a água a uma temperatura de entrada de aproximadamente 30°C.....	51
Quadro 8 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a óleo a uma temperatura de entrada de aproximadamente 50°C.....	52
Quadro 9 - Eficiências calorimétricas e reais obtidas para água, para as respetivas faixas de temperatura de ensaio.....	55
Quadro 10 - Eficiências calorimétricas e reais obtidas para óleo, para as respetivas faixas de temperatura de ensaio.....	56
Quadro 11 - Constantes de calibração de sondas de temperatura do tipo pt100 calibradas.	64
Quadro 12 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a água a uma temperatura de entrada de aproximadamente 30°C.....	66
Quadro 13 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a água a uma temperatura de entrada de aproximadamente 50°C.....	68
Quadro 14 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a água a uma temperatura de entrada de aproximadamente 70°C.....	70
Quadro 15 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a água a uma temperatura de entrada de aproximadamente 90°C.....	72

Quadro 16 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a água a uma temperatura de entrada acima da temperatura ambiente.....	74
Quadro 17 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a óleo a uma temperatura de entrada de aproximadamente 50°C.....	76
Quadro 18 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a óleo a uma temperatura de entrada de aproximadamente 70°C.....	77
Quadro 19 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a óleo a uma temperatura de entrada de aproximadamente 90°C.....	79

Lista de figuras

Figura 1 - Consumo energético mundial, 1990-2040, [3].....	3
Figura 2 - Revolução anual da Terra em torno do Sol, [5].....	4
Figura 3 – Mudanças anuais da posição do Sol no céu, [5].....	5
Figura 4 – Definição de latitude, ângulo solar horário e declinação solar, [5].....	5
Figura 5 – Variação anual da declinação solar, [5].	6
Figura 6 - Declinação solar, [5].	6
Figura 7 - Caminho diário aparente do sol pelo céu desde o nascer ao pôr-do-sol, [5].	8
Figura 8 - Ângulos solares, [5].	10
Figura 9 - Geometria de coletores para vários modos de seguimento solar, [5].....	11
Figura 10 - Variação diária da irradiância solar incidente numa superfície com seguimento solar a dois eixos, [5].	11
Figura 11 - Variação diária irradiância incidente na superfície inclinada no eixo norte-sul, com ajuste diário de inclinação, [5].....	12
Figura 12 - Variação diária da irradiância incidente numa superfície inclinada à latitude local, no eixo norte-sul e com seguimento solar no eixo este-oeste, [5].	13
Figura 13 - Variação diária da irradiância solar incidente numa superfície horizontal no eixo este-oeste e com seguimento solar no eixo norte-sul, [5].....	14
Figura 14 - Variação diária da irradiância solar incidente numa superfície horizontal no eixo norte-sul e com seguimento solar no eixo este-oeste, [5].....	15
Figura 15 - (a) seção transversal do calorímetro; (b) calorímetro sem isolamento, [2]	19
Figura 16 - Esquema representativo de uma fonte de radiação a uma distância R de um concentrador com área de abertura A_a e área de recepção A_r , [12].	20
Figura 17 - Diferentes tipos de absorvedores em CPCs, [5].	22
Figura 18 – a) CPC com absorsor invertido; b) CPC com absorsor inclinado, [5].	23
Figura 19 - Curva de rendimento de um coletor plano [14]	27
Figura 20 - Circuito hidráulico de ensaio de coletores solares térmicos água.....	31
Figura 21 - Plataforma de ensaios com um coletor CPC	34
Figura 22 - Sondas de temperatura aquando do processo de recolha de dados para calibração.....	36
Figura 23 – Dados da calibração da resistência equivalente.	37

Figura 24 - Esquema hidráulico para calibração do calorímetro.....	39
Figura 25 - Resultados e respetiva reta de calibração do calorímetro	40
Figura 26 - Excerto de programa LabVIEW desenvolvido para aquisição de dados e controlo do sistema.....	43
Figura 27 - Coletor solar térmico do tipo em ensaio.....	45
Figura 28 - Coletor solar térmico do tipo CPC em ensaio.	45
Figura 29 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a água à temperatura de entrada de 30°C	50
Figura 30 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a óleo à temperatura de entrada de 50°C	52
Figura 31 - Eficiência calorimétrica e eficiência real para ensaios a água	53
Figura 32 - Eficiência calorimétrica para ensaios a água e óleo.....	54
Figura 33 - Eficiência real para ensaios a água e óleo	55
Figura 34 - Esquema Unifilar representativo do circuito hidráulico do circuito de ensaio de coletores solares térmicos a água	61
Figura 35 - Esquema Unifilar representativo do circuito hidráulico do circuito de ensaio de coletores solares térmicos a óleo.....	62
Figura 36 - Esquema representativo do circuito elétrico	63
Figura 37 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a água à temperatura de entrada de 30°C	65
Figura 38 - Dados recolhidos do segundo ensaio a água à temperatura de entrada de 30°C	65
Figura 39 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a água à temperatura de entrada de 30°C	66
Figura 40 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a água à temperatura de entrada de 50°C	67
Figura 41 - Dados recolhidos do segundo ensaio a água à temperatura de entrada de 50°C	67
Figura 42 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a água à temperatura de entrada de 50°C	68
Figura 43 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a água à temperatura de entrada de 70°C	69
Figura 44 - Dados recolhidos do segundo ensaio a água à temperatura de entrada de 70°C	69

Figura 45 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a água à temperatura de entrada de 70°C	70
Figura 46 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a água à temperatura de entrada de 90°C	71
Figura 47 - Dados recolhidos do segundo ensaio a água à temperatura de entrada de 90°C	71
Figura 48 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a água à temperatura de entrada de 90°C	72
Figura 49 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a água à temperatura de entrada acima da temperatura ambiente	73
Figura 50 - Dados recolhidos do segundo ensaio a água à temperatura de entrada acima da temperatura ambiente	73
Figura 51 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a óleo à temperatura de entrada de 50°C	74
Figura 52 - Dados recolhidos do segundo ensaio a óleo à temperatura de entrada de 50°C	75
Figura 53 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a óleo à temperatura de entrada de 50°C	75
Figura 54 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a óleo à temperatura de entrada de 70°C	76
Figura 55 - Dados recolhidos do segundo ensaio a óleo à temperatura de entrada de 70°C	77
Figura 56 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a óleo à temperatura de entrada de 90°C	78
Figura 57 - Dados recolhidos do segundo ensaio a óleo à temperatura de entrada de 90°C	78
Figura 58 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a óleo à temperatura de entrada de 90°C	79

Nomenclatura

a	Distância média Terra-Sol	km
A_a	Área de abertura do coletor solar térmico	m^2
A_r	Área de recepção do coletor solar térmico	m^2
C	Fator de concentração solar	-
C_{2d}	Fator de concentração solar para um coletor bidimensional	-
C_{3d}	Fator de concentração solar para um coletor tridimensional	-
C_p	Calor específico da substância	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$
e	Excentricidade da elipse terrestre	-
$E_{\text{solar anual}}$	Energia emitida pelo sol durante um ano	J
F	Fator de extração de calor	-
F_{cal}	Fator de calibração do calorímetro	-
F_{r-f}	Fração energia radiada pelo recetor que chega à fonte	-
G_t	Irradiância solar global	W/m^2
h	Ângulo solar horário	$^\circ$
I	Corrente elétrica	A
I_{bn}	Radiação direta normal	W/m^2
I_d	Radiação difusa	W/m^2
L	Latitude local	$^\circ$
m	Massa da substância	kg
\dot{m}	Fluxo do FTQ	l/min
\dot{m}_{cal}	Fluxo do FTQ no calorímetro	l/min
N	Dia do ano	-
P_{cal}	Potência dissipada pelo calorímetro	W
P_{col}	Potência térmica fornecida pelo coletor solar térmico	W
P_{solar}	Potência emitida pelo sol	W
Q	Energia sob a forma de calor	W
q_{abs}	Energia absorvida sob forma de calor	W
Q_{ext}	Energia extraída sob a forma de calor	W
Q_f	Energia radiada pela fonte sob a forma de calor	W
Q_{f-r}	Energia emitida pela fonte e recebida pelo recetor	W
xi		

q_{perdas}	Energia perdida sob a forma de calor	W
Q_{r-f}	Energia emitida pelo recetor e recebida pela fonte	W
Q_u	Calor Útil	W
R	Distância Terra-Sol	km
r	Raio do sol	km
T	Temperatura	°C
T_f	Temperatura da fonte	°C
$T_{\text{entrada}_{\text{cal}}}$	Temperatura à entrada do calorímetro	°C
T_i	Temperatura de entrada do FTQ no coletor	°C
T_o	Temperatura de saída do FTQ no coletor	°C
T_r	Temperatura do recetor	°C
$T_{\text{saída}_{\text{cal}}}$	Temperatura à saída do calorímetro	°C
U_L	Coeficiente global perdas térmicos	W/(m ² °C)
V	Tensão elétrica	V
z	Ângulo solar azimutal	°
Z_s	Ângulo de azimute da superfície	°

Letras gregas

α	Altitude solar	°
α_n	Altitude solar ao meio dia	°
α_{placa}	Absortância da placa de absorção	-
β	Ângulo de inclinação da superfície	°
δ	Declinação solar	°
ΔT	Diferencial de temperatura	°C
η	Eficiência do coletor	-
η_0	Eficiência ótica do coletor	-
Θ	Ângulo de incidência solar numa superfície	°
Θ_m	Metade do ângulo de incidência de radiação solar numa superfície	°
ρ	Densidade	Kg/m ³
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/(m ² K ⁴)

τ	Transmissividade do vidro	-
$(\tau\alpha_{placa})_n$	Produto transmissividade vidro por absorvância placa para incidência normal	-
Φ	Ângulo solar zenital	°

Lista de abreviaturas

CPC	Concentrador Parabólico Composto
EN 12975-2:2006	Norma Europeia de ensaio de coletores solares térmicos
FTQ	Fluido de Transferência de Calor
LECS	Laboratório de Ensaio de Coletores Solares
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PT EN 12975-2:2007	Adaptação portuguesa da norma europeia de ensaio de coletores solares térmicos
TSA	Tempo Solar Aparente

1. Objetivo

A presente dissertação tem como objetivo a demonstração da utilização de técnicas calorimétricas para a medição de rendimento de coletores solares térmicos a operar acima dos 100°C, com recurso a um calorímetro [3] (desenvolvido na Cátedra BES - Energias Renováveis no âmbito de outra dissertação de mestrado) e recorrendo-se a um coletor solar térmico do tipo CPC e óleo térmico como FTQ. Os FTQs acima dos 100°C tendem a degradar-se e envelhecer [1], dificultando quaisquer medidas relativas à energia extraída.

Pretende-se verificar o comportamento do calorímetro desenvolvido integrado num banco de ensaios de coletores solares térmicos, comprovando-se a sua capacidade para fornecer dados de acordo com as exigências da respectiva norma de ensaios, EN 12975-2:2006. Teve-se ainda como objetivo o desenvolvimento do próprio banco de ensaios, baseado em óleo térmico como FTQ, em condições de compatibilidade com as normas em vigor.

Visando esses objetivos, apresenta-se uma introdução a diversos tópicos inerentes ao trabalho desenvolvido, nomeadamente, à energia solar, ângulos solares, calorimetria, coletores solares térmicos e à norma europeia de ensaio de coletores solares térmicos.

Aborda-se o banco de ensaios desenvolvido a nível hidráulico e de potência, bem como o desenvolvimento de software de aquisição de dados e controlo do circuito.

Tendo o banco de ensaios sido desenvolvido de acordo com a norma europeia de ensaio de coletores solares térmicos, EN 12975-2:2006, é feita uma abordagem às diversas especificações técnicas que esta exige para o desenvolvimento de um banco de ensaios de coletores solares térmicos.

Por fim, são apresentados os resultados obtidos da medida de rendimento de coletores solares térmicos a água e óleo e respetivas conclusões sobre os resultados e trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação.

2. Introdução

Para o desenvolvimento do trabalho proposto torna-se necessária a introdução de diversos conceitos, sendo estes apresentados ao longo deste capítulo introdutório, de modo a proporcionar-se um melhor entendimento.

2.1. Energia Solar

De acordo com medições já estabelecidas, a densidade média de potência radiada pelo Sol no exterior da atmosfera terrestre é de 1366 W/m^2 , valor conhecido por constante solar, e o raio da terra é de $6,37 \times 10^6 \text{ m}$, sendo a potência solar irradiada por:

$$P_{\text{solar}} = 1366 \times \pi \times 4,06 \times 10^{13} \cong 1,74 \times 10^{17} \text{ W} \quad 2.1$$

Um ano terrestre corresponde a aproximadamente 365.25 dias, devido à aproximação da rota elíptica da translação terrestre a uma circunferência, tendo cada dia 86400 segundos. A energia total da radiação solar que atinge a Terra, por ano, é:

$$E_{\text{solar anual}} = 1,74 \times 10^{17} \times 86400 \times 365,25 \cong 5,5 \times 10^{24} \text{ J} \quad 2.2$$

Em 2010, o consumo mundial de energia foi cerca de 555 EJ, Figura 1. Pela equação 2.2, observa-se que a Terra recebeu, aproximadamente, 5 500 000 EJ, em 2010, sob a forma de radiação solar. O consumo mundial de energia corresponde a, sensivelmente, 0.01% da energia recebida pela radiação solar, pelo que a energia solar seria suficiente para suprir as necessidades energéticas mundiais, caso houvesse um aproveitamento mundial desta na ordem dos 0.01%.

Consumo Energético Mundial

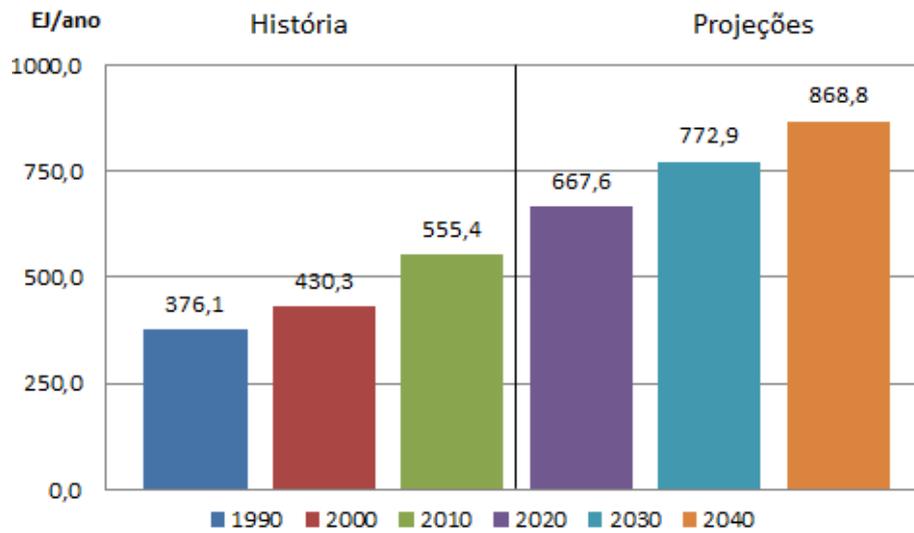


Figura 1 - Consumo energético mundial, 1990-2040, [4].

Contudo, a radiação incidente na superfície terrestre não será a mesma que incide no topo da atmosfera. Aproximadamente 30% da radiação solar é refletida para o espaço e cerca de 20% absorvida pelas nuvens e moléculas presentes no ar. A radiação solar não pode ser aproveitada em toda a superfície terrestre, sendo esta representada em cerca de três quartos por água. Contudo, considerando-se apenas 10% da radiação solar utilizável, apenas 0.1% dessa seria suficiente para fornecer energia ao planeta Terra [5].

Nos dias que correm já existe exploração de recursos renováveis, Quadro 1, contudo a percentagem de exploração é ainda demasiado baixa para as necessidades energéticas mundiais. A energia solar possui um enorme recurso potencial de ser aproveitado.

Quadro 1 - Recursos renováveis existentes e respetiva taxa de exploração, [5].

Type	Resource (EJ/year)	Implemented (EJ/year)	Percentage Explored
Solar	2,730,000	0.31	0.0012%
Wind	2,500	4.0	0.16%
Geothermal	1,000	1.2	0.10%
Hydro	52	9.3	18%

2.2. Ângulos Solares

O planeta Terra efetua uma rotação, sobre o seu próprio eixo, a cada 24 horas e uma revolução em torno do Sol, num período de aproximadamente 365.25 dias. A trajetória percorrida pela Terra é descrita por uma elipse, sendo o Sol um dos seus focos. Esta trajetória apresenta uma excentricidade bastante reduzida, igual a 0.01673, sendo quase circular. A distância Terra-Sol no periélio (menor distância, 3 de Janeiro) e no afélio (maior distância, 4 de Julho) é dada por [6]:

$$R = a \times (1 \pm e) \quad 2.3$$

Em que a = distância média Terra-Sol = $149,5985 \times 10^6$ km.

O sinal positivo da equação 2.3 representa a maior distância Terra-Sol, afélio ($152,1 \times 10^6$ km), e o sinal negativo a menor distância, periélio ($147,1 \times 10^6$ km), apresentado na Figura 2.

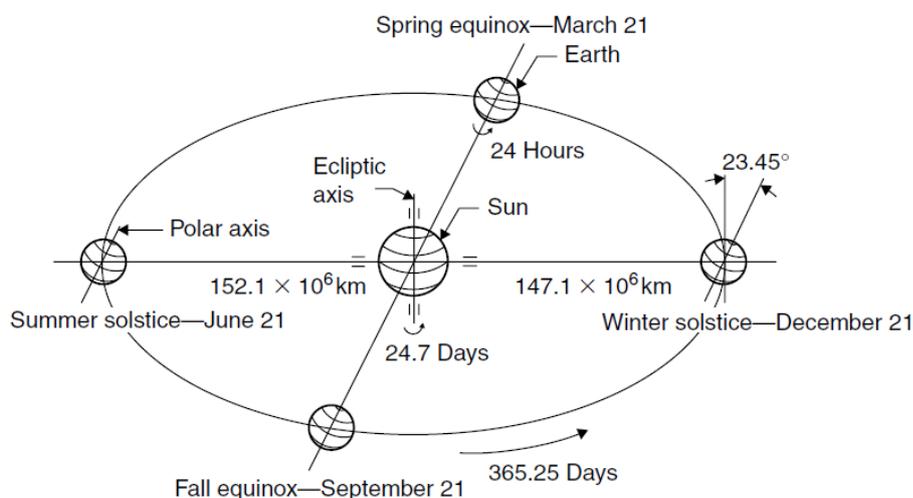


Figura 2 - Revolução anual da Terra em torno do Sol, [6].

Para um observador terrestre, num dado local, a posição do Sol vai mudando, no céu, ao longo dos dias e de hora a hora. Para um observador no hemisfério norte, é senso comum que o Sol se encontra mais elevado no Verão que no Inverno. A Terra descreve a sua revolução, ao longo do ano, em torno do Sol, rodando sobre o seu eixo, a cada 24 horas, que é inclinado com um ângulo de $23,45^\circ$ ao plano da rota elíptica, Figura 2.

A movimentação solar mais notável é o deslocamento diário, em arco, pelo céu, atingindo o ponto mais alto por volta do meio-dia. Desde o Inverno até ao Verão, os pontos de nascer

e pôr-do-sol deslocam-se mais para norte, ao longo do horizonte. No hemisfério norte os dias tornam-se mais longos, sendo o nascer do sol mais cedo, o pôr-do-sol mais tarde e a elevação solar superior, máxima no dia 21 de Junho (Solstício de Verão). O processo inverso ocorre no Inverno, no dia 21 de Dezembro (Solstício de Inverno). Os Solstícios são opostos no Hemisfério Sul, sendo o Solstício de Verão no dia 21 de Dezembro e o de Inverno no dia 21 de Junho. A meio do período de transição de Verão para Inverno e Inverno para Verão, ocorrem o equinócio de Primavera, 21 de Março, e o equinócio de Outono, 21 de Setembro (Figura 3).

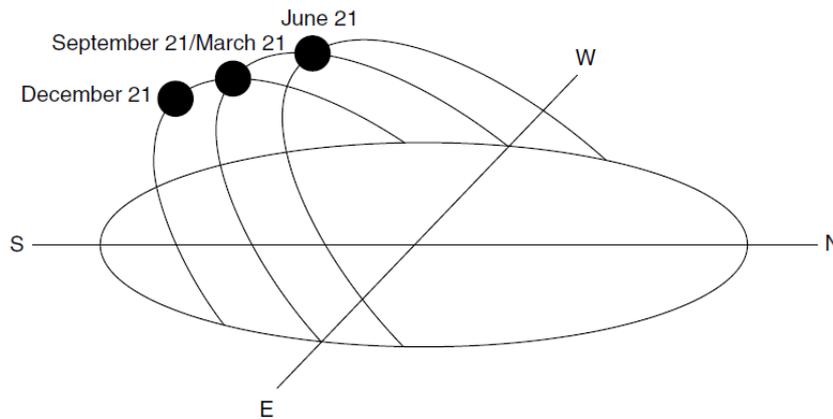


Figura 3 – Mudanças anuais da posição do Sol no céu, [6].

2.2.1. Declinação solar, δ

É a distância angular dos raios solares a norte (ou sul) do equador, sendo a declinação solar a norte do equador positiva e negativa a sul. A declinação solar é o ângulo entre a linha do centro da Terra ao centro do Sol e a projeção dessa mesma linha no plano equatorial, Figura 4.

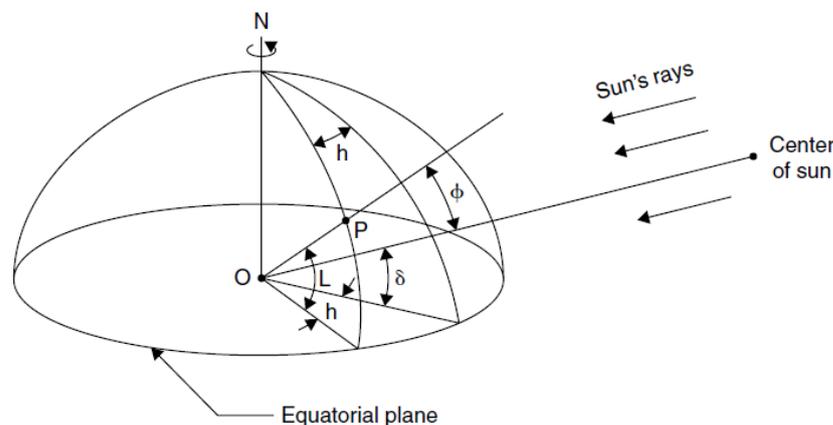


Figura 4 – Definição de latitude, ângulo solar horário e declinação solar, [6].

A declinação solar nos equinócios e nos solstícios é representada na Figura 5. Pode-se observar que a declinação varia de 0°, no equinócio da Primavera, a 23,45° no equinócio de Verão, sendo novamente 0° no equinócio de Outono, e -23,45° no solstício de Inverno.

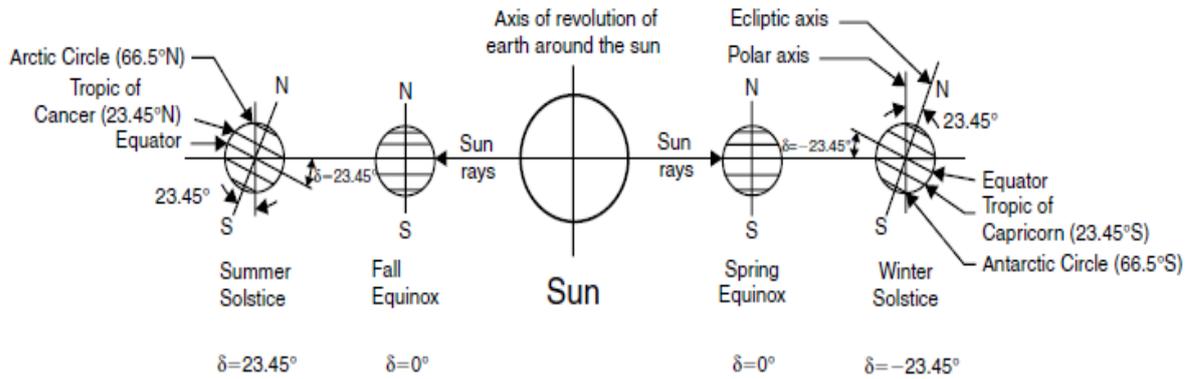


Figura 5 – Variação anual da declinação solar, [6].

A variação angular da declinação solar ao longo do ano é apresentada na Figura 6.

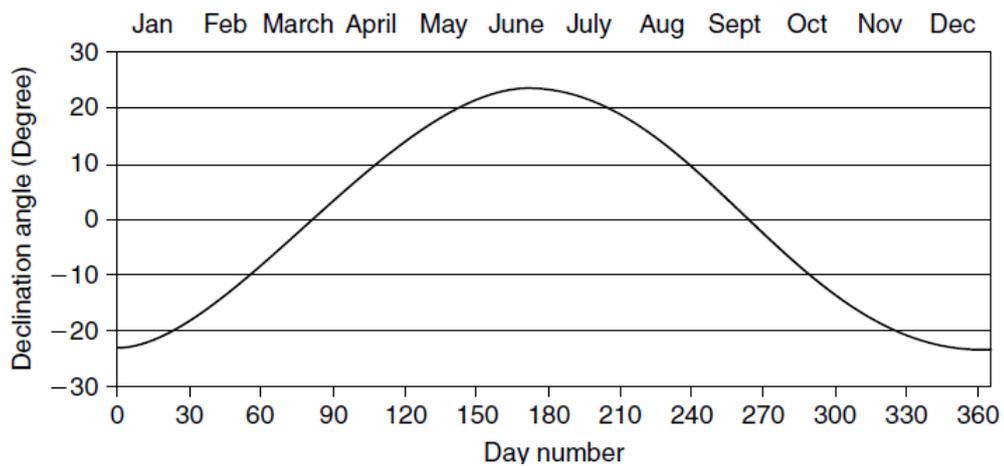


Figura 6 - Declinação solar, [6].

A declinação solar, em graus, pode ser calculada, aproximadamente, para qualquer dia do ano (N), por [7]:

$$\delta = 23,45 \times \sin \left[\frac{360}{365} \times (284 + N) \right] \quad 2.4$$

Quadro 2 - Dia central de cada mês, [6].

Mês	N (dia central mês)	Mês	N (dia central mês)
Janeiro	17	Julho	198
Fevereiro	47	Agosto	228
Março	75	Setembro	258
Abril	105	Outubro	288
Maiο	135	Novembro	318
Junho	162	Dezembro	344

A declinação solar durante um qualquer dia pode ser considerada constante para cálculos de engenharia [8], [9].

2.2.2. Ângulo Horário, h

É definido como o ângulo através do qual a Terra giraria para trazer o meridiano, de um dado ponto, sob o Sol. A Figura 4 mostra o ângulo solar horário do ponto P como sendo o ângulo medido no plano equatorial terrestre entre a projeção de OP e a projeção da linha central Terra-Sol. O ângulo horário ao meio-dia solar local é zero, 15° de longitude equivalem a 1 hora, sendo as horas do período da tarde designadas como positivas. O ângulo solar horário pode ser obtido a partir do tempo solar aparente (TSA), sendo:

$$h = (TSA - 12) \times 15^\circ \quad 2.5$$

Onde, ao meio-dia solar, TSA=12, $h=0^\circ$.

2.2.3. Ângulo da Altitude Solar, α

É o ângulo formado entre os raios solares e o plano horizontal, Figura 7. Relaciona-se com o ângulo solar zenital, Φ , que é dado pelo ângulo entre os raios solares e a vertical, sendo estes complementares. Assim:

$$\Phi + \alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ \quad 2.6$$

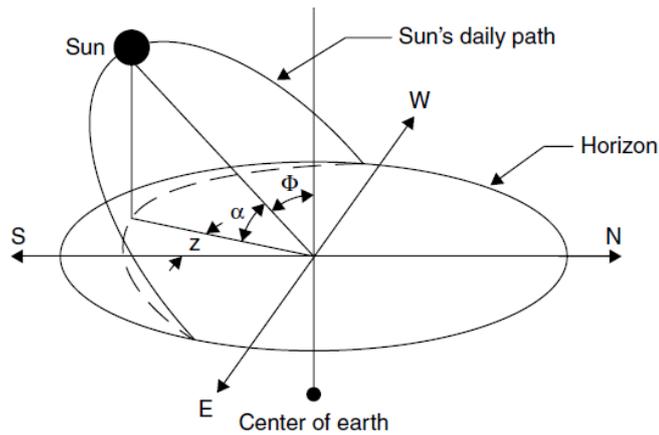


Figura 7 - Caminho diário aparente do sol pelo céu desde o nascer ao pôr-do-sol, [6].

A expressão matemática para o ângulo da altitude solar é dado pela equação 2.7:

$$\sin \alpha = \cos \Phi = \sin L \times \sin \delta + \cos L \times \cos \delta \times \cos h \quad 2.7$$

Onde L = latitude local, ângulo entre a linha desde o centro da Terra até ao local e o plano equatorial. A norte do Equador a latitude é positiva e a sul negativa.

2.2.4. Ângulo Solar Azimutal, z

É o ângulo solar dos raios solares, medidos no plano horizontal em relação ao sul para o hemisfério norte ou em relação ao norte para o hemisfério sul. Assume valor positivo a este do sul verdadeiro. A expressão matemática que o define:

$$\sin z = \frac{\cos \delta \times \sin h}{\cos \alpha} \quad 2.8$$

A equação 2.8 é correta, desde que, [10], $\cos h > \tan \delta / \tan L$. Caso tal não aconteça, deve-se ao sol se encontrar atrás da linha Este-Oeste, como na Figura 3. Para o período da manhã é $-\pi + |z|$ e para o período da tarde é $\pi - z$.

Por definição, o ângulo solar azimutal é 0° ao meio-dia solar, quando o sol está no meridiano que contém a linha norte-sul. Portanto a altitude ao meio-dia solar é:

$$\alpha_n = 90^\circ - L + \delta \quad 2.9$$

2.2.5. Ângulo de Incidência, Θ

É o ângulo entre os raios solares e a normal à superfície. Quando a superfície se encontra na horizontal, o ângulo de incidência, Θ , será igual ao ângulo zenital, Φ . A equação 2.10 descreve a expressão do ângulo de incidência ([8]; [9]).

$$\cos \Theta = \sin L \sin \delta \cos \beta - \cos L \sin \delta \sin \beta \cos Z_s + \cos L \cos \delta \cos h \cos \beta + \sin L \cos \delta \cos h \sin \beta \cos Z_s + \cos \delta \sin h \sin \beta \sin Z_s \quad 2.10$$

Onde,

β – Ângulo de inclinação da superfície, em relação à horizontal.

Z_s – Ângulo de azimute da superfície, ângulo entre a normal à superfície em relação ao verdadeiro sul. Toma valores positivos a oeste.

A equação 2.10 pode ser reduzida a formas mais simples, mediante casos específicos:

- Superfícies horizontais, $\beta=0^\circ$ e $\Theta=\Phi$ sendo a equação 2.10 reduzida à equação 2.7.

- Superfícies verticais, $\beta=90^\circ$, a equação 2.10 reduz-se a:

$$\cos \Theta = -\cos L \sin \delta \cos Z_s + \sin L \cos \delta \cos h \cos Z_s + \cos \delta \sin h \sin Z_s \quad 2.11$$

- Para superfícies, no hemisfério norte, viradas a sul e inclinadas, $Z_s=0^\circ$, sendo a equação 2.10 reduzida a:

$$\cos \Theta = \sin L \sin \delta \cos \beta - \cos L \sin \delta \sin \beta + \cos L \cos \delta \cos h \cos \beta + \sin L \cos \delta \cos h \sin \beta \quad 2.12$$

- Para superfícies, no hemisfério sul, viradas a norte e inclinadas, $Z_s=180^\circ$, a equação 2.10 reduz-se a:

$$\cos \Theta = \sin L \sin \delta \cos \beta + \cos L \sin \delta \sin \beta + \cos L \cos \delta \cos h \cos \beta - \sin L \cos \delta \cos h \sin \beta \quad 2.13$$

A equação 2.10 é a expressão geral para o ângulo de incidência dos raios solares numa superfície de qualquer orientação, sendo possível reduzi-la a formas mais simples, para casos mais específicos.

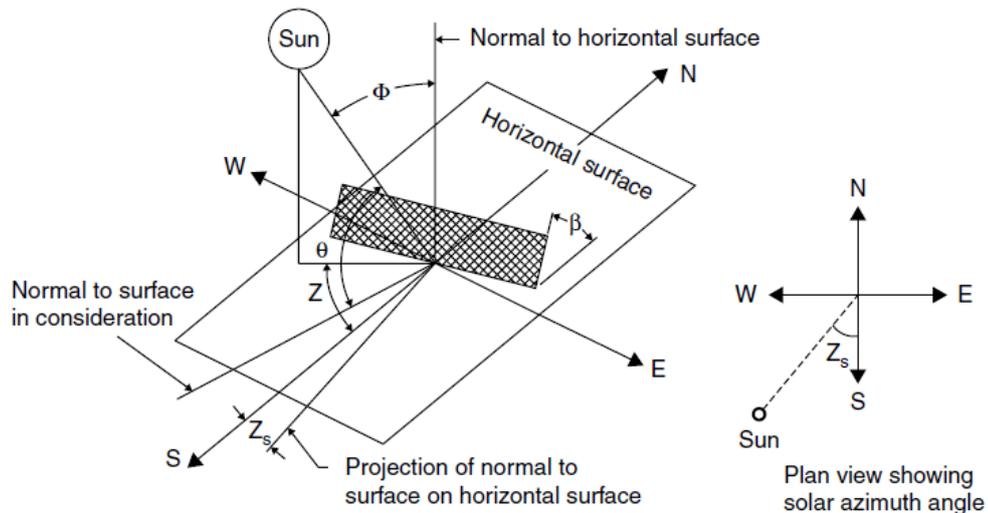


Figura 8 - Ângulos solares, [6].

2.2.6. Ângulo de incidência para superfícies em movimento

Os coletores solares concentradores são, geralmente, munidos de sistemas de seguimento, proporcionando um seguimento solar adequado. Tal pode ser alcançado com vários graus de precisão e diferentes tipos de seguimento solar, Figura 9, [6].

Os sistemas de seguimento solar podem ser classificados pelo seu modo de seguimento, que pode ser de um ou de dois eixos, como é observável na Figura 9. O modo de seguimento a um eixo, este pode ser feito de três maneiras distintas, [6]:

- Este-Oeste, Figura 9d;
- Norte-Sul, Figura 9c;
- Paralelo ao eixo terrestre, Figura 9b.

As equações que se seguem, para cada tipo de seguimento solar, são deduzidas a partir da equação geral do ângulo incidente da radiação solar numa superfície, equação 2.10, e aplicadas a planos em movimento.

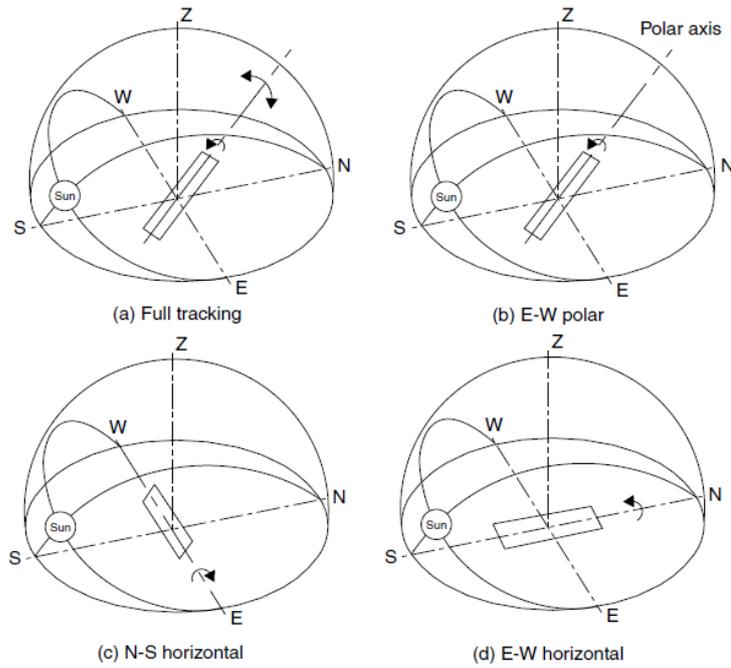


Figura 9 - Geometria de coletores para vários modos de seguimento solar, [6].

O seguimento solar a dois eixos, consiste em manter-se uma dada superfície orientada, continuamente, para o sol, Figura 9a, com ângulo de incidência, Θ , tal que:

$$\cos \Theta = 1 \quad 2.14$$

Ou seja, $\Theta=0^\circ$, este valor irá variar de acordo com a precisão do sistema de seguimento. Idealmente tomará o valor apresentado. O seguimento a dois eixos recebe o máximo de radiação solar possível. O desempenho deste tipo de sistema de seguimento solar é apresentado na Figura 10. Neste tipo de seguimento a superfície vai ter sempre inclinação, β , igual ao ângulo solar zenital, Φ , e o ângulo azimutal da superfície, Z_s , será igual ao ângulo solar azimutal, z . [6].

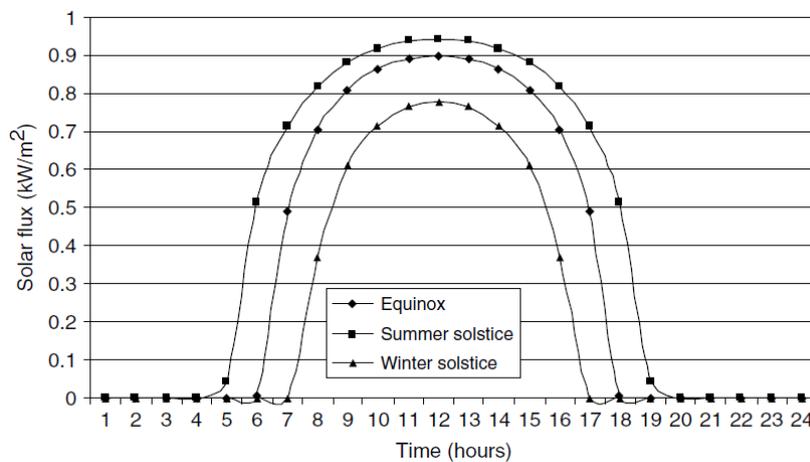


Figura 10 - Variação diária da irradiância solar incidente numa superfície com seguimento solar a dois eixos, [6].

Para sistemas de seguimento solar inclinados, no eixo norte-sul, com a inclinação ajustada diariamente de modo a que a normal à superfície coincida com os raios solares, Figura 9c, todos os dias, ao meio-dia solar, Θ será igual ([9]; [11]) a:

$$\cos \Theta = \sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cos h \quad 2.15$$

O desempenho deste tipo de sistemas é apresentado na Figura 11.

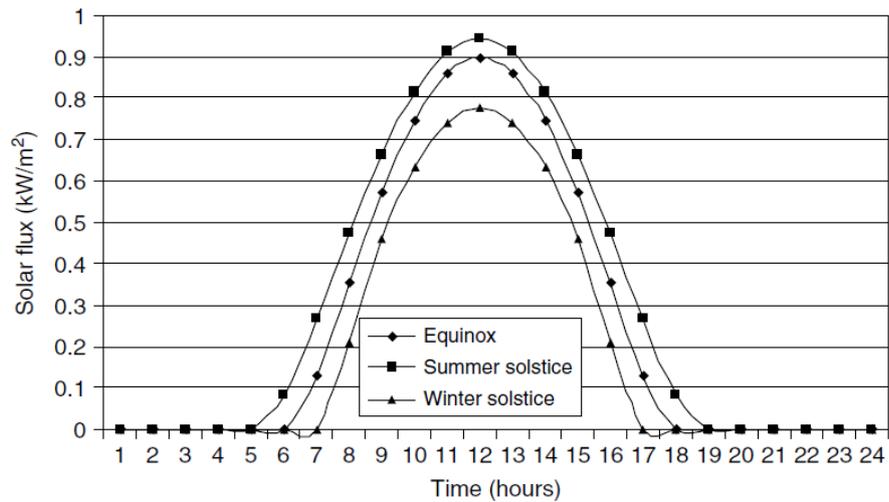


Figura 11 - Variação diária irradiância incidente na superfície inclinada no eixo norte-sul, com ajuste diário de inclinação, [6].

Para sistemas de seguimento onde a superfície gira em torno de um eixo norte-sul, paralelo ao eixo da Terra, com seguimento contínuo no eixo este-oeste, Figura 9b, tem-se:

$$\cos \Theta = \cos \delta \quad 2.16$$

Nesta configuração, o coletor está inclinado à latitude local. A radiação solar será normal ao coletor nos equinócios ($\delta=0^\circ$) e o efeito de cosseno será máximo nos solstícios. O desempenho deste tipo de sistema é apresentado na Figura 12.

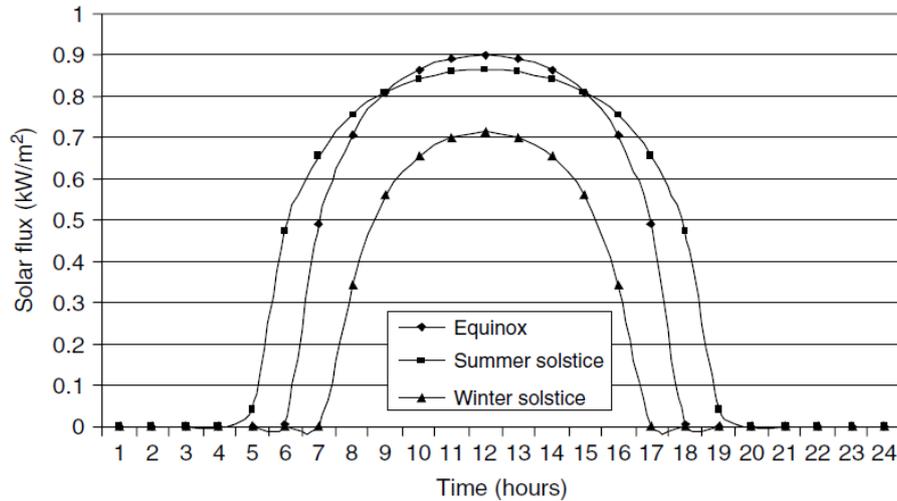


Figura 12 - Variação diária da irradiância incidente numa superfície inclinada à latitude local, no eixo norte-sul e com seguimento solar no eixo este-oeste, [6].

O desempenho do sistema, em termos de radiação solar recebida, é semelhante para os equinócios e para o solstício de verão, as massas de ar menores no solstício compensam o reduzido efeito de projeção de cosseno [6]. Ao meio-dia solar, no solstício de inverno, o valor da radiação recebida é menor devido à conjugação de ambos os efeitos referidos. Caso se pretenda aumentar o desempenho no inverno, seria necessária uma inclinação da superfície superior à latitude do local.

Para sistemas de seguimento solar norte-sul, onde a superfície gira sobre um eixo horizontal este-oeste com ajustamento contínuo para minimização do ângulo de incidência, Θ , tem-se ([8]; [9]):

$$\cos \Theta = \sqrt{1 - \cos^2 \delta \sin^2 h} \quad 2.17$$

Ou ([11]):

$$\cos \Theta = \sqrt{\sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cos^2 h} \quad 2.18$$

A geometria desta configuração é dada pela Figura 9c. Esta configuração tem a vantagem de aproximar-se ao seguimento solar a dois eixos, Figura 13, contudo o efeito de cosseno no inverno reduz a eficiência do sistema, sendo menor a radiação solar recebida pela superfície coletora. O desempenho no inverno é bastante reduzido, quando comparado ao verão.

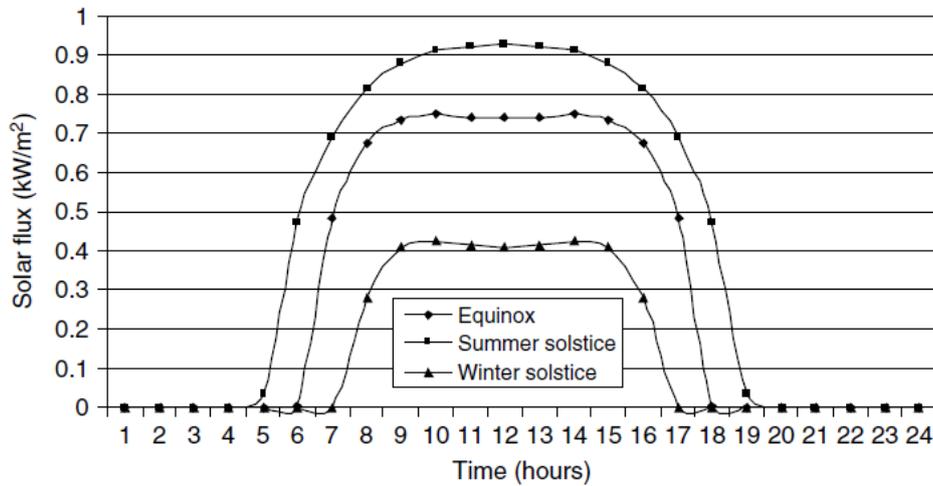


Figura 13 - Variação diária da irradiância solar incidente numa superfície horizontal no eixo este-oeste e com seguimento solar no eixo norte-sul, [6].

A inclinação da superfície é dada por:

$$\tan \beta = \tan \Phi |\cos z| \quad 2.19a$$

A orientação da superfície, para este tipo de seguimento solar, varia entre 0° e 180° caso o ângulo solar azimutal passe $\pm 90^\circ$. Para cada hemisfério

$$\begin{aligned} \text{Se } |z| < 90^\circ, Z_s &= 0^\circ \\ \text{Se } |z| > 90^\circ, Z_s &= 180^\circ \end{aligned} \quad 2.19b$$

Para sistemas horizontais, no eixo norte-sul e com seguimento este-oeste o ângulo de incidência é ([8]; [9]):

$$\cos \theta = \sqrt{\sin^2 \alpha + \cos^2 \delta \sin^2 h} \quad 2.20$$

Ou [11]:

$$\cos \theta = \cos \Phi \cos h + \cos \delta \sin^2 h \quad 2.21$$

A geometria da configuração deste sistema de seguimento solar é apresentado na Figura 9d, sendo a curva da radiação solar coletada apresentada na Figura 14.

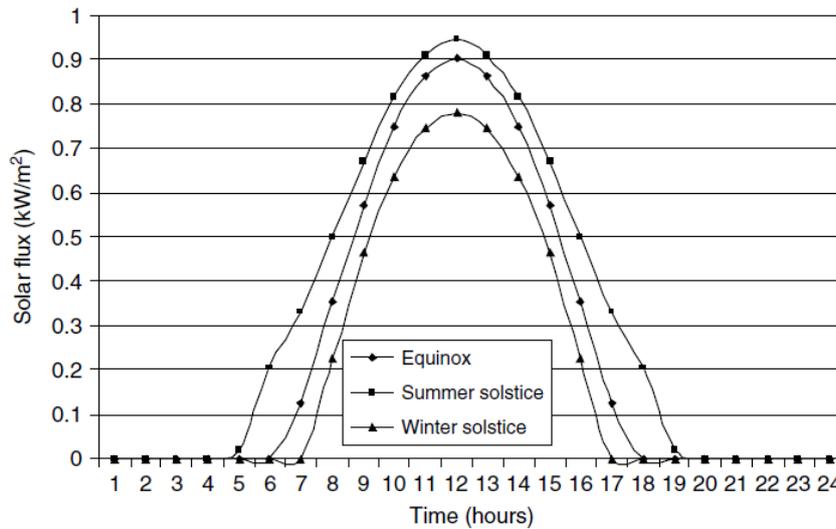


Figura 14 - Variação diária da irradiância solar incidente numa superfície horizontal no eixo norte-sul e com seguimento solar no eixo este-oeste, [6].

A inclinação da superfície será dada por:

$$\tan \beta = \tan \Phi |\cos(Z_s - z)| \quad 2.22a$$

O ângulo azimutal da superfície, Z_s , toma os valores de $\pm 90^\circ$, dependendo do ângulo solar azimutal:

$$\begin{aligned} \text{Se } z > 0^\circ, Z_s &= 90^\circ \\ \text{Se } z < 0^\circ, Z_s &= -90^\circ \end{aligned} \quad 2.22b$$

Em termos comparativos, o tipo de seguimento solar terá influência na radiação solar incidente na superfície coletora, em proporção do efeito de cosseno. A quantidade de energia a incidir numa superfície coletora, por unidade de área, para os equinócios e solstícios é apresentada no Quadro 3. A comparação é feita em relação à configuração onde ocorre o seguimento total (*full tracking*), recebendo o máximo de radiação solar possível. Conclui-se que o sistema de seguimento no eixo este-oeste ou norte-sul, com montagem polar, será uma boa aproximação ao seguimento total do sol.

Quadro 3 - Comparação da energia recebida para os vários modos de seguimento, [6].

Tracking mode	Solar energy received (kWh/m ²)			Percentage to full tracking		
	E	SS	WS	E	SS	WS
Full tracking	8.43	10.60	5.70	100	100	100
E-W polar	8.43	9.73	5.23	100	91.7	91.7
N-S horizontal	7.51	10.36	4.47	89.1	97.7	60.9
E-W horizontal	6.22	7.85	4.91	73.8	74.0	86.2
<i>Notes: E = equinoxes, SS = summer solstice, WS = winter solstice.</i>						

2.3. Calorimetria

No ensaio de coletores solares térmicos concentradores é necessário um método para os caracterizar acima dos 100°C. Os coletores planos, normais, funcionam sobretudo abaixo de 100°C e são ensaiados em circuitos a operar com água como FTQ, tendo de ser mais complexos (pressurizados) com o aumento da temperatura. Estes não costumam ser considerados para temperaturas de ensaio acima de 250°C.

Uma alternativa é o recurso a circuitos com outros FTQs, como óleos térmicos. Contudo, neste caso, o conhecimento do calor específico do fluido (C_p) e a medição do caudal (\dot{m}) não são tão simples de se obter, em comparação com a água.

A medição do caudal a diferentes temperaturas exige um caudalímetro especial capaz de acomodar, eventualmente, grandes variações de viscosidade do fluido e sendo capaz de manter uma precisão, independentemente da temperatura. O calor específico de um FTQ em função da temperatura pode ser conhecido, por intermédio de curvas fornecidas pelo fabricante, mas não será o mesmo uma vez que o fluido se vai degradando com o tempo e uso no circuito. Deste modo, o conhecimento do produto do caudal pelo calor específico torna-se difícil e trabalhoso de determinar.

De seguida é apresentada e explicada uma tecnologia calorimétrica para o desempenho destas funções.

2.3.1. Calorímetro

O calorímetro desenvolvido [3] permite conhecer de forma direta e simples, sem preocupação com eventual degradação do FTQ, o produto do caudal pelo calor específico que é, no fundo, o que interessa conhecer.

Recorrendo-se à calorimetria é possível medir ganhos e perdas de energia sob a forma de calor num sistema.

A temperatura é uma medida da energia cinética média das moléculas de uma substância, sendo usada para comparar com outros sistemas diferentes. Com o aumento da energia cinética do sistema, a temperatura deste também aumenta. Dois sistemas à mesma temperatura possuem a mesma energia cinética média [12].

Quando dois sistemas a diferentes temperaturas são colocados em contacto, trocam energia entre eles, alcançado o equilíbrio térmico. Pela Primeira Lei da Termodinâmica, a energia perdida ou ganha por um sistema tem de ser igual à energia perdida ou ganha pela vizinhança. Este é o princípio base para cálculo em calorimetria.

A quantidade de energia, sob a forma de calor (Q), necessária para produzir alteração de temperatura, depende do produto da massa da substância (m), do calor específico do material (C_p) e da mudança de temperatura pretendida (ΔT). Sendo esta quantidade expressa matematicamente por [12]:

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \quad 2.23$$

Para aplicação da medida do caudal e calor específico em circuitos de ensaio de coletores solares, concebeu-se um dispositivo [3] para ser atravessado pelo FTQ, dissipando no seu seio uma certa quantidade de energia, Q , e medir o produto do caudal pelo calor específico diretamente, pela equação 2.23, de forma a que:

$$\frac{Q}{\Delta T} = \dot{m} \times C_p \quad 2.24$$

Como \dot{m} (kg/s) é um caudal, Q (W) será uma potência, a potência dissipada no processo.

Para isto é necessário garantir que a potência dissipada seja consumida na subida de temperatura do fluido, isto é, que não haja perdas ou que, a existirem, sejam muito pequenas e sempre as mesmas, se possível, a todas as temperaturas a que a medida seja feita, para se poder dispor de uma calibração simples e independente da temperatura.

Assim, o calorímetro tem como objetivo a maximização da entrega de calor para o FTQ, a minimização e, principalmente, preservação das perdas térmicas constantes, dentro do possível, a qualquer temperatura de operação. Assim, foi desenvolvido um calorímetro em [3] com base nestas ideias.

A estrutura do calorímetro é apresentada na Figura 15, sendo este constituído por uma câmara interior cilíndrica, *inner chamber* (IC), onde o calor é fornecido por uma resistência elétrica imersa no FTQ e por uma câmara exterior, *outer chamber* (OC), através da qual o FTQ entra. Esta câmara exterior proporciona um ambiente para perdas térmicas à

temperatura de entrada do fluido na câmara interior. Assim, a potência dissipada para o fluido, é praticamente a mesma a qualquer temperatura que o calorímetro seja usado [3].

O esquema do calorímetro, Figura 15, assegura que o FTQ preencha a câmara interior e banhe o mais possível a resistência elétrica. Contudo, a câmara interior e exterior estão isoladas com lã de rocha [3] de modo a minimizar as perdas térmicas.

O calorímetro é instrumentado com sondas de temperatura, à entrada e saída do FTQ e a potência dissipada pela resistência elétrica é mensurada pela diferença de potencial a que é sujeita.

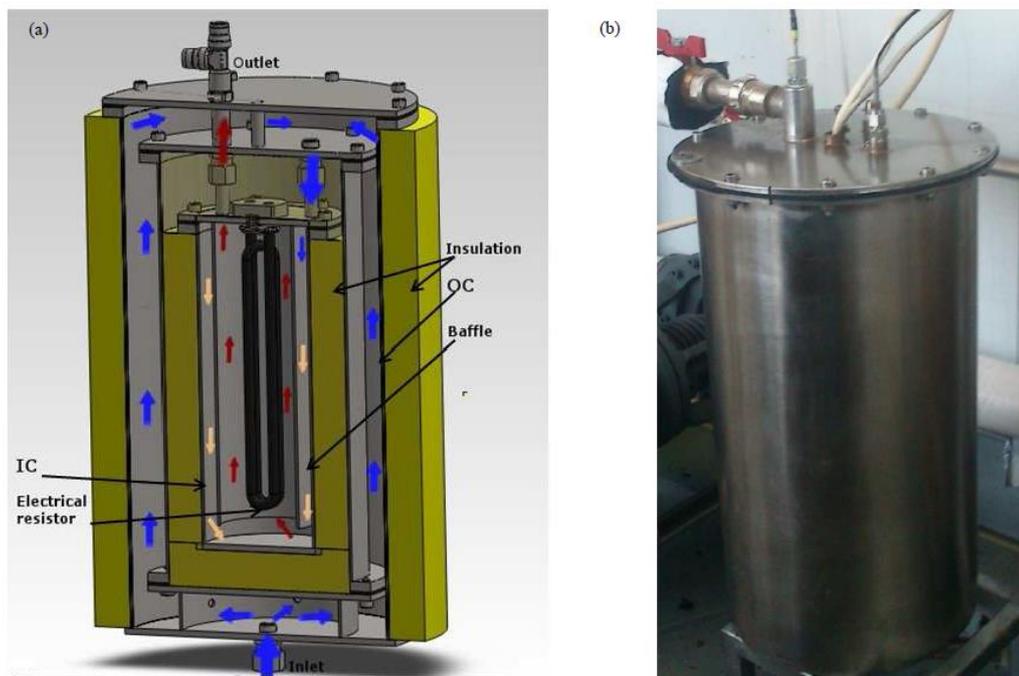


Figura 15 - (a) seção transversal do calorímetro; (b) calorímetro sem isolamento, [3]

A contribuição do calorímetro para o cálculo da eficiência de um coletor é apresentada no subcapítulo 2.4, aquando da abordagem ao desempenho de coletores solares térmicos.

2.4. Coletores Solares Térmicos

São, na realidade, captadores da radiação solar incidente associados a permutadores de calor que transformam a energia solar radiativa incidente na sua superfície em energia térmica, transferindo-a para um fluido de trabalho, FTQ. O seu processo de funcionamento consiste na absorção da radiação solar incidente, convertendo-a em calor que, por sua vez, será transferido para o FTQ (água, óleo ou ar) a circular pelo coletor. A energia térmica do fluido pode ser armazenada em depósito para uso posterior, em períodos noturnos ou nublados, como AQS ou para condicionamento de espaços.

Os coletores solares térmicos podem ser divididos em duas categorias, não concentradores ou concentradores. Os não concentradores têm a mesma área de captação e de absorção de radiação solar. Os do tipo concentrador são indicados para aplicações de elevada temperatura. Quando munidos de sistema de seguimento solar, apresentam superfícies refletoras côncavas de modo a concentrar a radiação solar para uma área recetora menor, aumentando o fluxo de radiação [6]. O fator de concentração solar é [13]:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad 2.25$$

Contudo, este fator é limitado pelo tipo de concentrador, podendo ser tridimensional (circular) como um paraboloide ou bidimensional (linear) como um concentrador cilíndrico parabólico. O fator máximo de concentração [13] pode ser obtido através da Segunda Lei da Termodinâmica, aplicada à troca de calor radiativo entre uma fonte e um recetor [14]. Considerando-se um concentrador circular com área de abertura A_a e área de absorção A_r a ver a fonte com raio r , a uma distância R , e com um ângulo de aceitação de radiação solar do concentrador de Θ_m , metade do ângulo total, Figura 16.

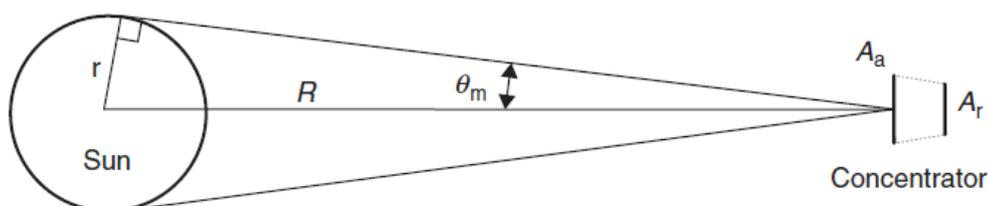


Figura 16 - Esquema representativo de uma fonte de radiação a uma distância R de um concentrador com área de abertura A_a e área de recepção A_r , [13].

É possível encontrar-se o valor máximo de concentração associado ao ângulo que a radiação incidente faz com a superfície de captação do coletor (A_a). Considerando-se a fonte e o recetor corpos negros à temperatura T_f (temperatura da fonte) e T_r (temperatura do recetor), a quantidade de radiação emitida pela fonte é [6]:

$$Q_f = (4\pi r^2)\sigma T_f^4 \quad 2.26$$

A fração da radiação intercetada pelo recetor será [6]:

$$F_{f-r} = \frac{A_a}{4\pi R^2} \quad 2.27$$

Portanto, a energia radiada pela fonte e recebida pelo concentrador é [6]:

$$Q_{f-r} = A_a \frac{4\pi r^2}{4\pi R^2} \sigma T_f^4 = A_a \frac{r^2}{R^2} \sigma T_f^4 \quad 2.28$$

Um corpo negro recetor radia energia igual a $A_r\sigma T_r^4$ e a fração desta que chega à fonte é dada por [6]:

$$Q_{r-f} = A_r F_{r-f} \sigma T_r^4 \quad 2.29$$

Sob estas condições idealizadas, a temperatura máxima do recetor é igual à da fonte, pela Segunda lei da Termodinâmica, isto é verdade quando $Q_{f-r} = Q_{r-f}$, portanto pelas equações 1.28 e 1.29 [6]:

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} F_{r-f} \quad 2.30$$

Dado que o valor máximo de F_{r-f} é igual a 1, o valor máximo do fator de concentração para um concentrador tridimensional é ($\sin \theta_m = r/R$) [6]:

$$C_{3d} = \frac{1}{\sin^2 \theta_m} \quad 2.31$$

E para um concentrador bidimensional [6]:

$$C_{2d} = \frac{1}{\sin \theta_m} \quad 2.32$$

Com $\Theta_m=0,27^\circ$, correspondente a metade do ângulo de aceitação de radiação solar, o limite de concentração para concentradores circulares é assim de 45000 vezes e para concentradores lineares de 212 vezes [6].

Os concentradores que satisfazem esta relação de concentração dizem-se não produtores de Imagem ou Anidólicos, porque a radiação ao ser absorvida no recetor, perdeu completamente a informação relacionada com o ângulo de incidência que tinha na sua entrada.

Em contraste, os concentradores do tipo lente convencional ou de espelhos parabólicos, estão muito longe do limite em termos de concentração, mas preservam a informação associada ao ângulo de incidência, pelo que são referidos como focalizantes ou produtores de imagem.

2.4.1. Concentradores solares térmicos do tipo CPC

São concentradores não formadores de imagem (*Non Imaging Optics*), com capacidade de refletir toda a radiação incidente para a placa de absorção, dentro de amplos limites. A necessidade de movimentar o concentrador de modo a acompanhar o movimento solar pode ser reduzido pela utilização de duas seções de parábola, Figura 17.

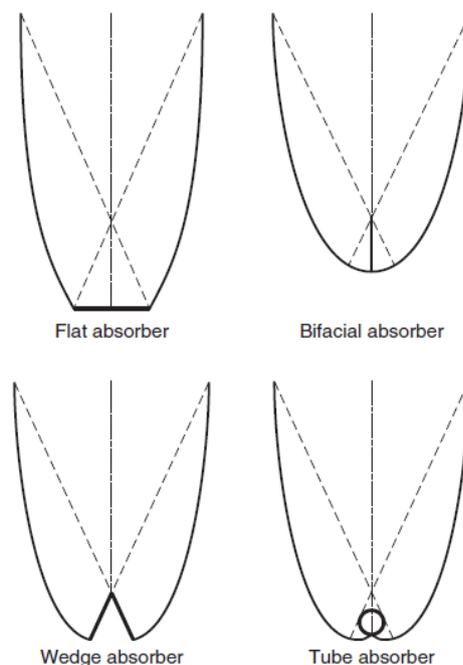


Figura 17 - Diferentes tipos de absorvedores em CPCs, [6].

Os CPCs podem ser desenhados para ângulos de aceitação de radiação solar grandes, acomodando o movimento aparente do sol durante o dia, sem necessidade de seguimento do mesmo. Através de múltiplas reflexões internas, qualquer radiação que incida na área de abertura, no intervalo de ângulos de aceitação do concentrador, atinge o absorvedor. Este pode tomar diferentes geometrias, Figura 17.

Para aplicações a temperaturas mais elevadas pode utilizar-se um CPC com ajuste periódico da sua inclinação solar, se o seu ângulo de aceitação assim o exigir. Normalmente, semiângulos inferiores a 30° já exigem pelo menos dois ajustes por ano.

Os CPCs podem ser do tipo simétrico e assimétrico. São muitas as configurações possíveis. A título de exemplo considere-se o caso de serem concebidos para funcionar com a placa de absorção invertida, sendo a radiação direcionada para a parte inferior da placa por um concentrador CPC, Figura 18a. Deste modo, as perdas térmicas do absorvedor são significativamente reduzidas, estando a parte superior do absorvedor bem isolada e visto que a corrente convectiva é bloqueada pelo próprio absorvedor. Outra configuração possível é a utilização do absorvedor inclinado, Figura 18b. Quando comparadas com coletores solares térmicos planos, estas configurações apresentam uma eficiência ótica inferior, devido a perdas por dispersão no refletor. Contudo, têm melhor eficiência a temperaturas mais elevadas [6].

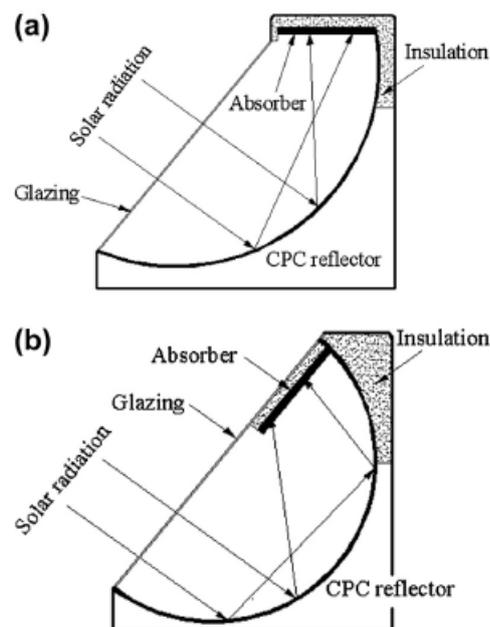


Figura 18 – a) CPC com absorvedor invertido; b) CPC com absorvedor inclinado, [6].

2.4.2. Desempenho de coletores solares térmicos

O desempenho térmico de coletores solares térmicos pode ser determinado pela análise detalhada das características óticas e térmicas dos materiais do coletor e do seu *design* ou através de ensaio, sob condições atmosféricas controladas.

Estes podem ser testados por dois métodos: sob condições estacionárias ou por um procedimento de ensaio dinâmico. O método de ensaio sob condições estacionárias é amplamente usado e os procedimentos de ensaio encontram-se bastante desenvolvidos e descritos em documentos como a EN 12975-2:2006, norma europeia de ensaio de coletores solares térmicos. Em certas zonas do mundo as condições estacionárias são facilmente alcançáveis, levando-se poucos dias a ensaiar um coletor. Contudo, em outros locais estas condições podem ser mais difíceis de alcançar, sendo os ensaios apenas possíveis em certos períodos do ano, principalmente no verão, necessitando-se de um maior período de ensaio.

Pelo método tradicional de ensaio é necessária a medição de alguns parâmetros:

- Irradiância solar global no plano do coletor, G_T ;
- Irradiância solar difusa no plano do coletor;
- Velocidade do vento sob a área de abertura do coletor;
- Temperatura do ar ambiente; T_a ;
- Temperatura de entrada do FTQ à entrada do coletor, T_i ;
- Temperatura de saída do FTQ à saída do coletor, T_o ;
- Fluxo de FTQ, \dot{m} .

A área de abertura do coletor, A_a , também necessita de ser conhecida com precisão. A eficiência de um coletor solar térmico pode ser dado em função da área de abertura por:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a I_{col}} \quad 2.33$$

Em que,

Q_u representa o calor útil, ganho térmico do FTQ ao passar no coletor (W), sendo:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_o - T_i) \quad 2.34$$

Contudo a eficiência pode ser rescrita, pela definição [15], como:

$$\eta = \frac{Q_{\text{ext}}(T)}{A_a I_{\text{col}}} \quad 2.35$$

Em que,

$Q_{\text{ext}}(T)$, pode ser descrita pela diferença entre a energia absorvida pela placa recetora (q_{abs}) e a energia perdida pela mesma (q_{perdas}), equação 2.36 [15].

$$Q_{\text{ext}}(T) = q_{\text{abs}} - q_{\text{perdas}}(T) \quad 2.36$$

A energia absorvida não é dada em função da temperatura, sendo determinada pelas características óticas do sistema. A radiação atravessa uma placa transparente, vidro, com um coeficiente de transmissão, τ , e é absorvida por uma placa recetora com absorptância, α [15].

$$q_{\text{abs}} = A_a I_{\text{col}} \tau \alpha_{\text{placa}} \quad 2.37$$

O produto do coeficiente de transmissão do vidro pela absorptância da placa é normalmente aproximado por uma função empírica do ângulo de incidência (θ) da radiação sobre o coletor [15], sendo:

$$\tau \alpha_{\text{placa}} = (\tau \alpha_{\text{placa}})_n \left[1 - 0.1 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \right] \quad 2.38$$

Sendo $(\tau \alpha)_n$ o valor de $(\tau \alpha)$ quando os raios solares incidem perpendicularmente ao coletor ($\theta=0$).

Na determinação das perdas introduz-se um fator U_L (coeficiente global de perdas do coletor) e representa-se q_{perdas} [15] por:

$$q_{\text{perdas}}(T) = A_a U_L (T_{\text{placa}} - T_{\text{amb}}) \quad 2.39$$

Juntando-se as equações 2.35, 2.36, 2.37, 2.38 e 2.39 [15] temos:

$$\eta(T) = (\tau\alpha_{placa}) - \frac{U_L(T)(T_{placa} - T_{amb})}{I_{col}} \quad 2.40$$

Esta equação também descreve outro tipo de coletores, por exemplo concentradores, sendo neste caso [15]:

$$\eta(T) = \eta_0 - \frac{U_L(T)(T_{placa} - T_{amb})}{I_{col}} \quad 2.41$$

Em que η_0 se designa por rendimento ótico. O cálculo da energia fornecida por um coletor baseia-se na equação 2.41. Como a temperatura da placa de absorção é de difícil determinação, pode-se exprimir o rendimento instantâneo do coletor em função de temperaturas mais fáceis de determinar. Sendo T_i a temperatura de entrada no coletor e T_o a temperatura de saída, define-se a temperatura média do fluido, T_F , como sendo [15]:

$$T_F = \frac{(T_i + T_o)}{2} \quad 2.42$$

Do ponto de vista do cálculo da energia fornecida pode usar-se T_F , T_i ou T_o sendo no entanto necessário introduzir um fator de extração de calor, F , que permita passar a equação 2.41 para [15] :

$$\eta(T_x) = F \left[\eta_0 - \frac{U_L(T_x)(T_x - T_{amb})}{I_{col}} \right] \quad 2.42$$

Em que,

Geralmente $F=F'$, quando $T_x=T_F$, representando o fator que traduz a eficiência com que se dá a transferência de energia da placa recetora para o fluído circulante.

Os parâmetros $F'\eta_0$ e $F'U_L$ podem ser estimados pelo conhecimento dos materiais empregues no coletor e tendo em conta a geometria e o modo de funcionamento deste. Mas estes parâmetros devem ser sempre medidos para cada coletor, quando se efetua um ensaio de eficiência de um coletor, os produtos $F'\eta_0$ e $F'U_L$ são diretamente determinados pelo ensaio. Sendo $F'\eta_0$ e $F'U_L$ determinados para incidência normal dos raios solares, o primeiro resulta da interseção com o eixo e o segundo do declive da reta obtida. Na Figura 19 encontra-se uma curva característica do rendimento de um coletor solar plano [15].

$$\eta = 0.72 - 6.75 (T_f - T_a)/I$$

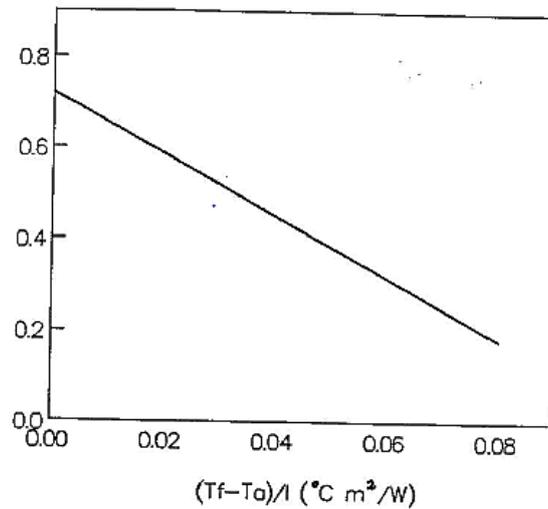


Figura 19 - Curva de rendimento de um coletor plano [15]

A radiação incidente, I_{col} , para um coletor concentrador é dado por:

$$I_{col} = \frac{I_{bn}}{\cos \theta} + \frac{I_d}{C} \quad 2.43$$

Em que,

C – Fator de concentração do coletor

Sendo I_{bn} a radiação direta normal, I_d a radiação difusa e θ o ângulo de incidência na abertura do coletor. Nos ensaios abordados no trabalho, θ será zero visto que o coletor encontrava-se montado numa plataforma de modo a seguir o sol a dois eixos. Sendo a radiação solar, medida por um piranómetro, no plano do coletor dada por:

$$I_{col} = I_{bn} + I_d \quad 2.44$$

Como o fator de concentração do coletor, C, a ser ensaiado é de 1.15 considera-se como se de um coletor plano se tratasse para efeitos de determinação da eficiência e usa-se a radiação incidente dada pela equação 2.44, sendo esta uma determinação da EN 12975-2:2006, para coletores com fator de concentração inferior a 3.

Em circuitos de ensaios a operar com um FTQ diferente de água, a precisão da medição do fluxo é mais delicada, sendo em particular o produto $\dot{m}C_p(T)$ difícil de saber. Os óleos

térmicos, como FTQ, têm tendência a degradar com o tempo e utilização, não sendo prática, ou até mesmo impossível, a medição da sua degradação [3].

Recorrendo-se a técnicas calorimétricas, é possível uma medida direta do produto $\dot{m}C_p$, colocando-se um calorímetro em série com o circuito de ensaios, onde uma determinada potência elétrica é dissipada para o FTQ, sendo a sua temperatura medida à entrada e saída do calorímetro [3].

O produto $\dot{m}C_p(T)|_{cal}$ é [3]:

$$\dot{m}C_p(T)|_{cal} = \frac{P_{cal}}{(T_{saída} - T_{entrada})} \quad 2.45$$

Em que,

P_{cal} – Potência térmica dissipada pelo calorímetro (W).

O produto $\dot{m}C_p(T)$ é obtido pelo fator de correção do calorímetro, F_{cal} , em [3], por:

$$\dot{m}C_p(T) = \dot{m}C_p(T)|_{cal} \times F_{cal} \quad 2.46$$

Deste modo, é possível uma medição precisa do produto do fluxo de massa pelo calor específico em qualquer circunstância, para qualquer FTQ e eventual mudança ou degradação das propriedades do mesmo [3]. Com recurso a técnicas calorimétricas, pode-se determinar a eficiência do coletor solar térmico por [3]:

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T)(T_o - T_i)}{A_a I_{col}} \quad 2.47$$

2.5. Norma de ensaio de coletores solares térmicos

A norma EN 12975-2:2006, a partir da qual a PT EN 12975-2:2007 é estabelecida, especifica métodos de ensaio para a determinação da capacidade de um coletor solar térmico resistir à influência de agentes de degradação.

São enumeradas diversas considerações a ter aquando da criação de um circuito de ensaio de coletores solares térmicos, bem como especificações técnicas na configuração do mesmo. São, também, referidos os requisitos de ensaio de modo a ser possibilitada a certificação de coletores solares térmicos.

Esta norma fornece métodos de ensaios e procedimentos de cálculo para a determinação do desempenho térmico de coletores solares térmicos no estado estacionário. Contém métodos de realização de ensaios no exterior ao longo do dia, sob condições estacionárias de temperatura de entrada do FTQ no coletor, irradiância solar natural e condições de vento pré-definidas, reais ou simuladas.

3. Banco de Ensaios

De modo a realizarem-se ensaios de coletores solares térmicos com maior estabilidade na temperatura de entrada do coletor, melhorou-se o banco de ensaios existente [3], recorrendo-se ao controlo e instrumentação associada, de modo a garantir a estabilidade da temperatura de entrada do FTQ no coletor, com uma variação de $\pm 0,1$ °C para água e $\pm 0,2$ °C para óleo.

3.1. Circuito Hidráulico

O desenvolvimento de um novo circuito de ensaios de coletores solares térmicos foi efetuado com base nas recomendações da norma de ensaio de coletores solares térmicos, EN 12975-2:2006, tendo sido melhorada a estabilidade da temperatura de entrada do FTQ no coletor solar térmico pela introdução de novas técnicas de controlo.

De modo a controlar-se a temperatura de entrada no coletor, recorreu-se a um chiller de modo a extrair calor do FTQ, por intermédio de um permutador de calor em contracorrente.

O fluxo de FTQ do circuito de aquecimento é imposto por uma bomba de circulação, este tem um erro associado de 0,2% e é mantido constante durante o ensaio. O circuito de arrefecimento tem fluxo variável, sendo controlado por um variador de frequência controlado por software, de acordo com a necessidade de arrefecimento. Esta inovação no circuito permite maior estabilidade na temperatura de entrada do FTQ no coletor, não sendo necessário ajuste manual num potenciómetro para controlo fino de frio. Esta implementação foi possibilitada pelo desenvolvimento de um software de aquisição e controlo, sendo este abordado com maior detalhe no capítulo 3.

A caldeira serve de depósito, sendo a sua resistência ligada quando necessário o aumento da temperatura de ensaio para outra faixa de temperatura, dando-se um salto térmico.

Em suma, o FTQ sai da caldeira, pela imposição de um fluxo por uma bomba de circulação, entra no calorímetro onde é pré-aquecido por uma resistência elétrica, passando no permutador de calor para estabilização da temperatura de entrada no coletor, sendo

encaminhado para o coletor solar térmico, onde aquece e regressa ao depósito, sendo este ciclo repetido durante os ensaios.

O circuito contém diversas válvulas de corte permitindo a existência de *bypasses* a diferentes partes do circuito, garantindo-se assim flexibilidade para alterações e manutenção necessária.

A título de exemplo o circuito hidráulico desenvolvido para os ensaios em que o FTQ é água encontra-se na Figura 20, o circuito hidráulico a óleo é idêntico, encontrando-se equipado com equipamentos específicos para ensaios a óleo.



Figura 20 - Circuito hidráulico de ensaio de coletores solares térmicos água.

No circuito hidráulico a óleo para temperaturas de entrada no coletor mais baixas usou-se um permutador maior, de modo a proporcionar maior arrefecimento do FTQ, devido ao reduzido diferencial de temperatura entre o fluido de arrefecimento e o FTQ, conseguindo-se uma melhor estabilização da temperatura de entrada no coletor. Com o aumento da temperatura de ensaio, trocou-se de permutador, instalando-se um de menores dimensões de modo a não causar demasiado arrefecimento, devido à elevada diferença de temperatura entre o FTQ e o fluido de arrefecimento e ao calor específico superior a temperaturas mais baixas, possibilitando-se assim a estabilização da temperatura de entrada no coletor com maior facilidade em temperaturas de ensaio superiores as 70 °C.

O esquema do circuito de ensaio de coletores solares térmicos a água encontra-se no Anexo 1 e o esquema do circuito de ensaio de coletores solares térmicos a óleo no Anexo 2.

3.1.1. Características dos circuitos e da plataforma de ensaios

Os circuitos hidráulicos existentes apresentam diferentes equipamentos, sendo o Quadro 4 um resumo dos equipamentos existentes e respectivas marcas.

Quadro 4 - Quadro resumo dos equipamentos instalados em cada circuito

	Circuito de água	Circuito de óleo	Circuito de frio
Depósito	-	-	Reservatório Solar 2Store
Variador de frequência	Altivar 12	Toshiba VF – nC3	Altivar 28
Bomba de circulação	Wilo Star ST 20/7	Wilo-VeroLine-IPH-O	Wilo Star ST 20/7
Vaso de expansão	Zilmet 11A Solar Plus	-	-
Caudalímetro	ISOIL MS 501	GE Rheonik RHM 04	-
Visor caudalímetro	ISOIL ML 110	GE Rheonik RHE08	-

Os dois circuitos hidráulicos permitem diferentes temperaturas de operação e diferentes fluxos de FTQ, como apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Temperatura e fluxo máximo do FTQ para cada circuito hidráulico

	Água	Óleo
Caudal máximo	5 l/min	6 kg/min
Temperatura máxima	95 °C	150 °C
Pressão máxima	6 bar	6 bar
Incerteza da temperatura de entrada do FTQ	± 0,1°C	± 0,2°C

A irradiância solar incidente no plano do coletor é medida com recurso a um piranómetro e a velocidade do vento no local com um anemómetro de vela, ver Quadro 6.

Quadro 6 - Equipamentos de medição da irradiância solar (W/m^2) no plano do coletor e velocidade do vento (m/s)

Equipamento	Modelo	Constante de calibração
Piranómetro	Hukseflux SR11	$2,05 \times 10^{-5} V/Wm^{-2}$
Anemómetro de vela	-	-

As características do coletor solar térmico do tipo CPC são apresentadas no Quadro 7.

Quadro 7 - Características do coletor solar térmico do tipo CPC ensaiado [16], [17]

	Coletor Solar Térmico CPC Power ST1
Área de abertura	2,06 m ²
Fator de Concentração	1,15
Eficiência ótica	0,74-0,78

O circuito de ensaio de coletores solares térmicos possui uma plataforma onde são montados os coletores a ser ensaiados. Esta plataforma permite um seguimento solar, por ação manual, em azimute e em altura solar. A plataforma possibilita a montagem de até dois coletores solares térmicos e uma inclinação máxima de, aproximadamente, 66°. O seguimento em solar não é total, sendo limitado em altura solar pela inclinação máxima da plataforma e em azimute pelas tubagens de ligação ao coletor. Para efeitos práticos, a flexibilidade existente considera-se suficiente. Na Figura 21 observa-se a plataforma de ensaios com um coletor montado.

Como se pretendia testar um coletor solar térmico do tipo CPC, com temperaturas de entrada do FTQ no coletor acima dos 100°C. Como era necessário conhecer as propriedades específicas do FTQ, sem misturas, em operação foi necessário recorrer-se a um óleo térmico (BP Transcal N [18]) uma vez que permite temperaturas de operação superiores, até 320°C.

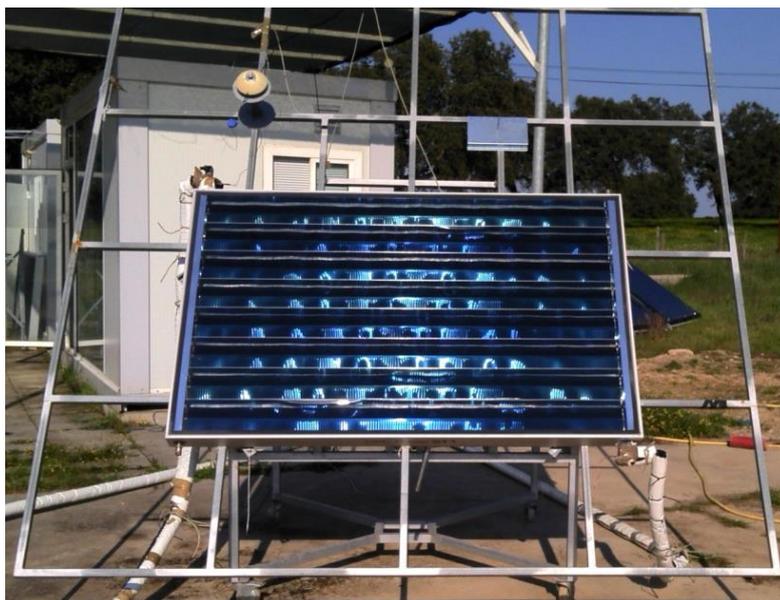


Figura 21 - Plataforma de ensaios com um coletor CPC

3.2. Circuito de potência e controlo

O quadro elétrico da instalação tem proteções contra curto-circuito ou sobrecarga, barramento de terra, e disjuntores de modo a proteger o circuito contra efeitos térmicos e mecânicos resultantes de possíveis excessos de corrente elétrica no circuito.

O esquema do circuito elétrico existente no circuito de ensaios de coletores solares térmicos encontra-se no Anexo 3.

Para monitorização dos circuitos de ensaio de coletores solares térmicos a água e a óleo, estes foram devidamente instrumentados, permitindo a monitorização de diferentes parâmetros ao longo do circuito, nomeadamente o fluxo e temperaturas do FTQ, e a irradiância global incidente no coletor solar térmico. Estes parâmetros são importantes para o controlo do sistema, sendo o conhecimento da temperatura de entrada do FTQ no coletor solar térmico fundamental, permitindo decidir a ação necessária de modo a garantir a sua estabilidade na entrada do coletor solar térmico e, também, a do ensaio.

Ambos circuitos foram propriamente instrumentados de modo a haver uma monitorização da evolução das temperaturas ao longo destes. Recorreram-se a sondas de temperatura previamente calibradas. Tendo sido instaladas em locais específicos do circuito, de modo a adquirir-se a temperatura em diversos pontos e poder ser tomada alguma ação quando necessário.

Para obtenção de dados precisos são necessárias medidas precisas, tendo sido calibradas sondas de temperatura, uma resistência equivalente e determinado o fator de calibração do calorímetro de modo a obter-se maior precisão. Os restantes aparelhos não referidos, como o piranómetro e medidores de caudal, já se encontravam calibrados.

3.2.1. Calibração de sondas de temperatura

Calibraram-se várias sondas de temperatura de modo a instrumentar-se o circuito, possibilitando-se a monitorização das temperaturas do circuito de ensaio de coletores solares térmicos. Nem todas as sondas calibradas foram utilizadas, tendo ficado algumas de reserva para eventuais necessidades. As sondas calibradas eram do tipo PT100, consistindo em termorresistências de platina que permitem medições fiáveis, numa ampla faixa de temperaturas. As medições efetuadas por estas sondas são medições a 4 fios, evitando-se adulteração de resultados por perdas nos cabos.

As sondas foram submetidas a diversas temperaturas, sendo a temperatura correta fornecida pela sonda de referência, calibrada no LECS, a partir da qual as restantes sondas foram calibradas. Aqueceu-se um fluido, água, com uma resistência elétrica e um misturador, garantindo a aquisição de dados em regime turbulento e a uma temperatura constante. As faixas de temperatura para a calibração foram de 40°C a 95°C (40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C e 95°C) tendo sido feito primeiro o aquecimento de 40°C a 95°C e posteriormente o arrefecimento, no sentido inverso. Submeteram-se as sondas a uma dada temperatura, durante cinco minutos, adquirindo-se os dados. Na Figura 22, observam-se as sondas de temperatura presas num suporte providenciado de modo a estarem todas imersas, ao mesmo nível, aquando da recolha dos dados.



Figura 22 - Sondas de temperatura aquando do processo de recolha de dados para calibração.

Os dados obtidos pelas sondas não são temperatura mas sim valores de resistência, sendo esta que varia com a temperatura, são termorresistências (PT100). Contudo, a temperatura a que foram submetidas foi medida por uma sonda de referência, da qual se dispunha da equação de conversão da resistência elétrica gerada para a temperatura correspondente. Foi necessário o tratamento dos dados obtidos, de modo a definirem-se as equações de obtenção de temperatura para cada uma das sondas calibradas.

Conhecendo-se a temperatura da sonda de referência, por intermédio da sua constante, definem-se as equações de calibração para obtenção da temperatura das restantes sondas, em função das resistências medidas. Efetuou-se um tratamento dos dados, de modo a inserir parâmetros numa aplicação, que fornece as constantes de calibração, em função da resistência, para cada sonda. Deste modo, obtiveram-se as constantes de calibração para cada sonda de temperatura, apresentadas no Anexo 4.

3.2.2. Calibração de resistência equivalente para medição de corrente elétrica

Foi calibrada uma resistência equivalente de modo a conhecer-se a corrente elétrica do circuito (I), sabendo-se assim a potência elétrica (P) fornecida à resistência elétrica do calorímetro. Esta calibração prévia foi feita com o intuito de detetar alguma influência de temperatura na resistência que afetasse os dados.

A metodologia de calibração consistiu numa resistência equivalente, associação de quatro resistências em paralelo, a ser percorrida por diferentes intensidades de corrente elétrica, fornecida por uma fonte de alimentação, durante cinco minutos para cada valor de intensidade de corrente. Foi medida, assim, a tensão gerada nos terminais da resistência equivalente do circuito.

Os dados recolhidos foram dispostos graficamente de modo a definir-se uma correlação que fornecesse o valor de intensidade de corrente elétrica em função da queda de tensão na resistência, Figura 23.

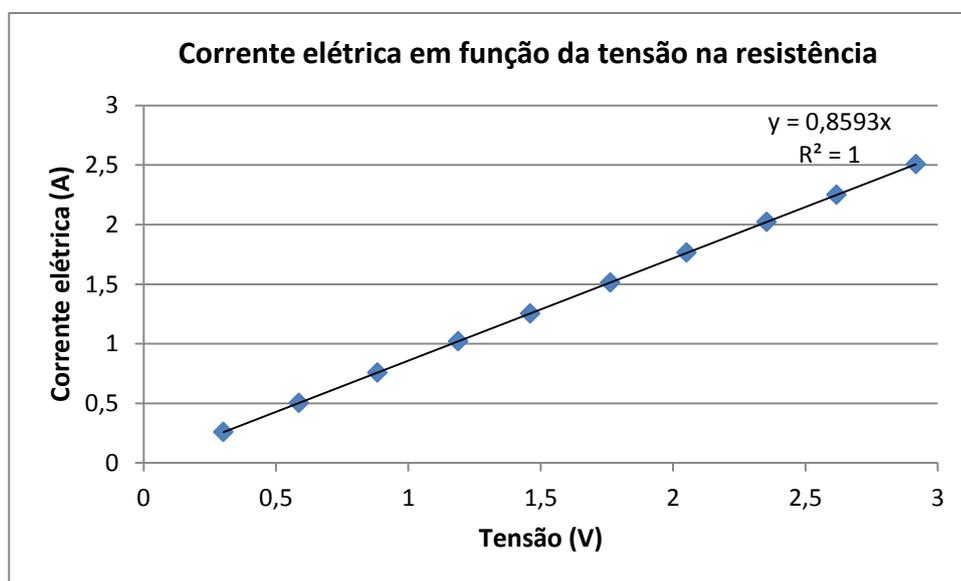


Figura 23 – Dados da calibração da resistência equivalente.

A correlação apresentada prevê a corrente elétrica (I) no circuito, em função da tensão (V), com exatidão ($R^2=1$), sendo a corrente elétrica:

$$I = 0,8593 \times V \quad 3.1$$

Assim, ao medir-se a tensão do circuito, com o conhecimento da constante de calibração, Equação 3.1, conhece-se a corrente elétrica gerada na resistência equivalente, determinando-se a potência dissipada pela resistência elétrica do calorímetro:

$$P_{\text{cal}} = I \times U \quad 3.2$$

Com a calibração prévia efetuada, não se detetou influência da temperatura nos

resultados.

3.2.3. Determinação do fator de calibração do calorímetro

Para a calibração do calorímetro efetuou-se um *bypass* ao coletor solar térmico de modo a que, após o permutador, o FTQ regressa-se diretamente para a caldeira.

Para determinação do fator de calibração do calorímetro utilizou-se um circuito que consistia na circulação do FTQ, água, aquecido pela caldeira elétrica, depósito de 100 litros com uma resistência elétrica de 6 kW, a percorrer o calorímetro. A temperatura de entrada do calorímetro manteve-se constante com recurso a um permutador de calor e água fria fornecida pelo chiller. O fluxo do FTQ foi medido com uma precisão de 0.2% por um caudalímetro eletromagnético, calibrado no LECS, e calculou-se o calor específico do FTQ (C_p), [19], em função da temperatura (T), por:

$$C_p = 4218,525 - 2,55222T + 5,51766E^{-2}T^2 - 4,9454E^{-4}T^3 + 2,3426E^{-6}T^4 - 3,79E^{-9}T^2 \quad 3.3$$

A água usada como FTQ na calibração do calorímetro e nos ensaios encontrava-se no seu estado puro, sem quaisquer misturas, de modo a conhecer-se com exatidão as suas propriedades físicas, para qualquer temperatura.

O caudalímetro usado para medição do fluxo do FTQ era volumétrico, tendo sido convertido para um fluxo mássico, [19], calculou-se a densidade do FTQ (ρ), água, em função da temperatura pela equação 3.4:

$$\rho = 1 + 0,0000117T - 0,0000059T^2 + 2,008E^{-8}T^3 - 3,897E^{-11}T^4 \quad 3.4$$

Os fluxos de FTQ impostos no circuito eram controlados com recurso a um variador de frequência associado a uma bomba de circulação. Os fluxos variaram entre 1l/min e 2,5l/min e as temperaturas de entrada do calorímetro situaram-se entre os 45°C e os 100°C.

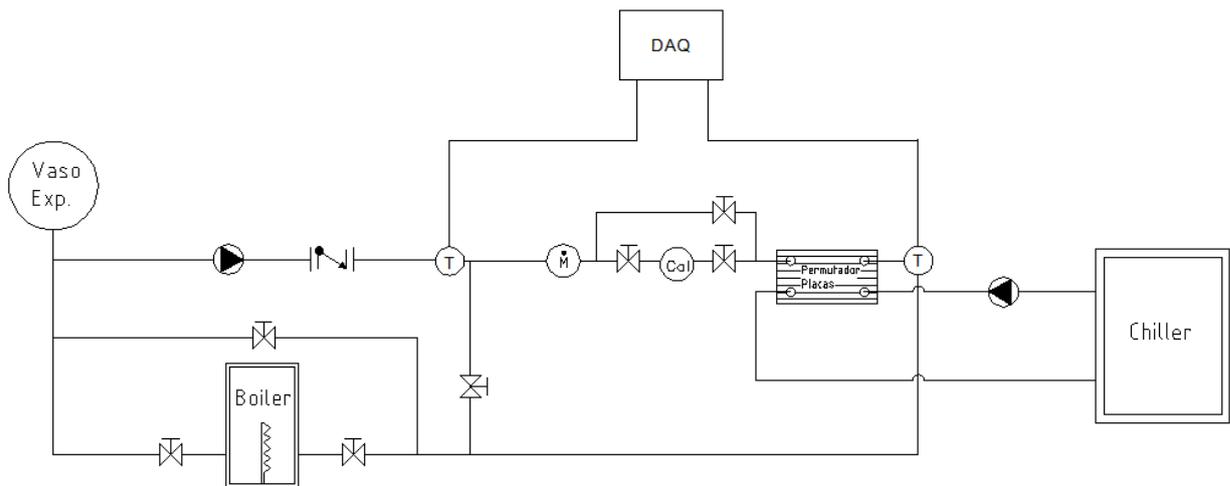


Figura 24 - Esquema hidráulico para calibração do calorímetro.

O circuito de calibração do calorímetro não contemplava o coletor solar, Figura 24.

Cada ensaio era definido por dois parâmetros, o fluxo e a temperatura do FTQ, assim, esperava-se [3]:

$$\dot{m}C_p(T)|_{\text{real}} = \dot{m}C_p(T)|_{\text{cal}} \times F_{\text{cal}} \quad 3.5$$

Para cada temperatura e fluxo de ensaio, obtiveram-se valores de fluxos do FTQ no calorímetro e pela medição direta com o caudalímetro.

Os fluxos foram, aproximadamente, 1, 1,5, 2 e 2,5 l/min e as temperaturas médias da câmara interior do calorímetro foram de 45, 65, 75, 85 e 100 °C. Efetuando-se o tratamento dos dados obtidos, obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 25 e respetiva calibração.

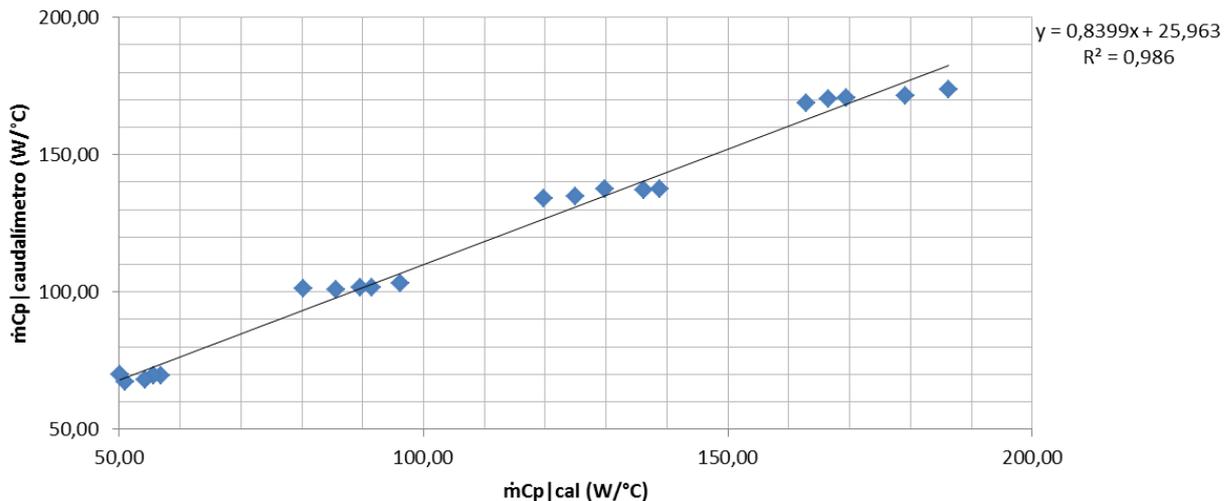


Figura 25 - Resultados e respetiva reta de calibração do calorímetro

3.2.4. Controlo da temperatura do FTQ

A norma de ensaio de coletores solares térmicos, EN 12975-2:2006, define que a temperatura de entrada do FTQ no coletor solar térmico tem de ser constante durante o respetivo ensaio.

De modo a garantir a estabilidade da temperatura de entrada do FTQ no coletor solar térmico, foi desenvolvido um software, a partir de uma versão pré-existente [3], permitindo a aquisição de dados relativos ao circuito e o controlo da temperatura de entrada do FTQ.

Para controlo da temperatura de entrada do FTQ recorreu-se ao circuito de frio. Esse controlo permitia o aumento ou diminuição do fluxo de frio, controlando-se assim o arrefecimento necessário de modo a garantir a temperatura de entrada pretendida. A modificação da velocidade da bomba de circulação do circuito de frio efetuava-se com recurso ao software desenvolvido. No software, definiu-se um controlo da tensão de saída de um Arduino [20] (placa de controlo eletrónico), sendo essa tensão transmitida a um inversor de frequência que, conseqüentemente, modifica a frequência de funcionamento da bomba de circulação do circuito de frio, fazendo variar o fluxo do fluido.

Com a programação criada, possibilitou-se a definição da frequência de funcionamento da bomba de circulação sem necessidade de se recorrer a um potenciómetro manual. Na prática, a implementação cria um potenciómetro digital com vinte níveis discretos de

intensidade, permitindo um controlo com pequenas variações entre níveis de intensidade, sendo, assim, um controlo mais preciso.

Uma explicação mais detalhada sobre o programa desenvolvido e utilizado será apresentada no capítulo 3.

4. Programação desenvolvida

De modo a adquirirem-se os dados dos instrumentos de medida instalados no circuito hidráulico, da irradiância incidente no plano do coletor solar térmico, da temperatura ambiente e do controlo de frio, desenvolveu-se um programa em linguagem LabVIEW, a partir de uma versão pré-existente [3].

Toda a instrumentação do circuito encontrava-se ligada a um sistema de aquisição de dados, Agilent [21]. Visto que este apenas adquiria mas não o guardava dados, desenvolveu-se o programa de modo a possibilitar o registo de dados. Os dados adquiriam-se em valores de tensão e resistência, sendo convertidos para as respetivas grandezas físicas.

Para as sondas ao longo do circuito e no exterior, sonda de temperatura ambiente, os dados obtinham-se em termos de resistência e para a irradiância incidente no plano do coletor solar térmico e o fluxo do FTQ no circuito obtinham-se em termos de tensão. Definiu-se, no programa, os canais nos quais os equipamentos se encontravam ligados e definiu-se se a leitura de cada como resistência ou tensão. Definindo-se os parâmetros de leitura, inseriu-se a constante de calibração para cada equipamento, de modo a que obtivessem os dados nas respetivas grandezas físicas para cada leitura.

O fluxo no calorímetro é [3]:

$$\dot{m}_{\text{cal}} = \frac{P \times 60}{C_p \times (T_{\text{saida}_{\text{cal}}} - T_{\text{entrada}_{\text{cal}}}) \times \rho} \quad 4.1$$

Para obtenção do caudal no calorímetro em tempo real, definiu-se a potência dissipada pela resistência, equação 3.2, o calor específico do FTQ, equação 3.3 e a densidade do FTQ, equação 3.4, para os ensaios em que o FTQ era água.

De modo a que o programa registe os dados lidos pelo Agilent, criou-se um mecanismo de registo dos dados, sendo registados em ficheiros de formato de arquivo de texto, podendo ser facilmente acedidos.

Os dados são dispostos graficamente, em tempo real, possibilitando-se a visualização da dinâmica térmica do circuito, da temperatura ambiente e da irradiância incidente no coletor.

O programa permite, o controlo do fluxo do circuito de frio, como previamente referido. No programa LabVIEW define-se um caractere alfabético que representa a quantidade de fluxo de frio necessário. Essa informação é transmitida ao Arduino, que, associa esse caractere à tensão de saída que necessita de fornecer ao variador de frequência que, por sua vez, controlará a bomba de circulação. A programação em Arduino efetuou-se de modo a que a tensão transmitida ao variador de frequência resultasse da informação recebida do LabVIEW, tendo sido a tensão de saída definida em vinte níveis percentuais. Esta implementação possibilitou o controlo de frio de modo mais preciso, facilitando-se a estabilização da temperatura de entrada no coletor.

A programação LabVIEW é bastante extensa, sendo apresentada uma imagem de parte desta, neste caso o modo de como se obtém as temperaturas de algumas sondas do circuito e o fluxo do FTQ, Figura 26.

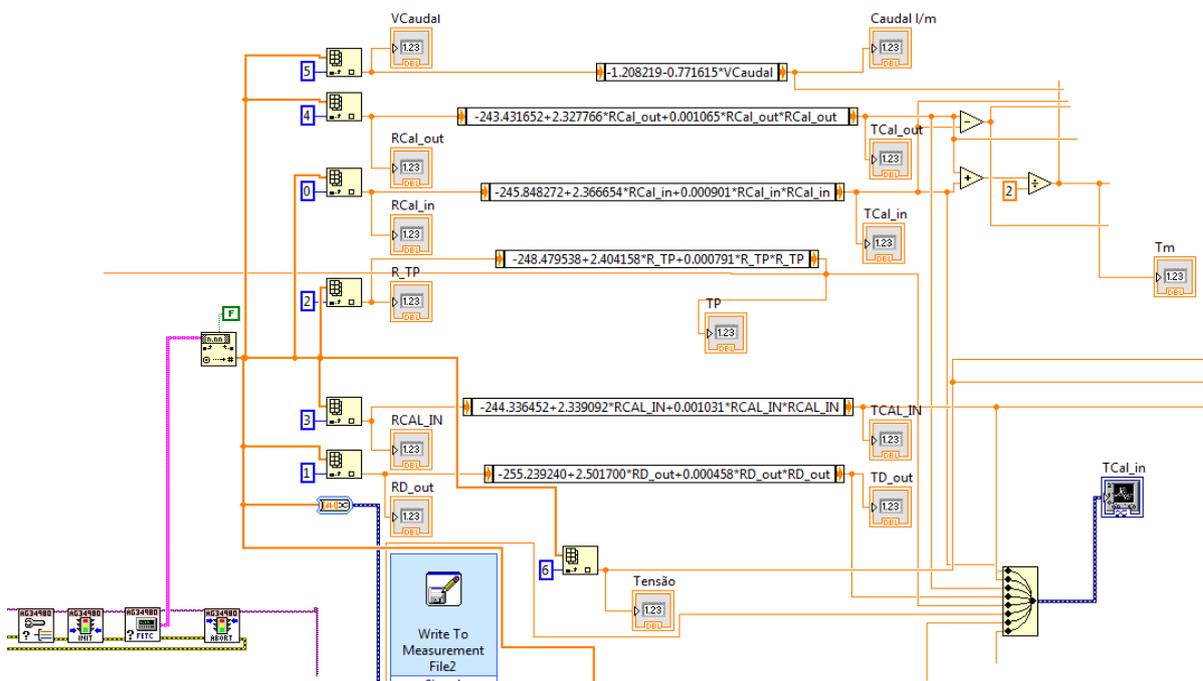


Figura 26 - Excerto de programa LabVIEW desenvolvido para aquisição de dados e controlo do sistema.

5. Especificações e procedimento de ensaio

Para o ensaio de coletores solares térmicos existem diversas especificações técnicas para vários parâmetros tais como as medições que devem ser efetuadas, instalação do coletor, requisitos de equipamento utilizado, entre outros. O método de ensaio utilizado será também descrito.

5.1. Especificações técnicas

A norma EN 12975-2:2006 estabelece especificações técnicas para vários parâmetros do circuito de ensaios de coletores solares térmicos, sendo alguns referenciados neste subcapítulo.

A estrutura na qual o coletor é montado não deve, de modo algum, obstruir a área de recepção e não pode afetar, significativamente, o isolamento lateral ou posterior do coletor, Figura 27 e Figura 28. Sendo necessário garantir uma distância mínima entre o coletor e o solo de 0,5 m.

O coletor pode ser montado virado a sul, sem seguimento, contudo o tempo de ensaio será restrito ao intervalo de tempo em que se obtém ângulos de incidência dentro do intervalo do ângulo de aceitação do coletor. Uma melhor abordagem consiste na utilização de um sistema de seguimento solar a dois eixos, em altitude e azimute solar, com recurso a um sistema automático ou manual. O coletor não pode ser afetado por projeções de sombras na área recetora ao longo da sua movimentação de seguimento solar, como demonstrado na Figura 27 e Figura 28.



Figura 27 - Coletor solar térmico do tipo em ensaio.



Figura 28 - Coletor solar térmico do tipo CPC em ensaio.

Para a análise de resultados de ensaios no exterior, a irradiância solar que não seja diretamente proveniente do disco solar é considerada como tendo uma incidência isentrópica no coletor. Para minimização dos erros existentes a partir desta aproximação, o coletor deve ser colocado num local onde não exista radiação solar refletida, em proporção significativa, a incidir no coletor, proveniente de edifícios ou superfícies. A refletividade da

maioria das superfícies, como vegetação, betão ou gravilha é baixa, pelo que não causam problemas nos ensaios de coletores solares térmicos.

A área em torno do local onde o coletor se encontra montado não deve conter superfícies capazes de emitir irradiação térmica, pelo que podem afetar o desempenho deste.

O desempenho dos coletores solares térmicos pode ser afetado pela velocidade do vento. Assim, os coletores têm de estar montados de modo a serem percorridos por vento em todas as suas superfícies.

Para medir a irradiância global incidente é recomendada a utilização de um piranómetro no plano do coletor. Para medição da radiação difusa é aconselhado o acoplamento de uma banda de sombreamento ou a utilização de um pireliómetro em conjunto com o piranómetro. Os instrumentos de medição da radiação devem-se encontrar no plano do coletor sem o sombrear, recebendo assim a mesma radiação solar que o coletor.

De modo a medir o ângulo de incidência da radiação solar direta, pode ser usado um dispositivo simples como um ponteiro normal à superfície do coletor.

No ensaio de coletores é necessária a medição de três temperaturas. Estas são a temperatura do FTQ à entrada e à saída do coletor e a temperatura ambiente. O sensor à entrada do coletor deve estar, no máximo, a uma distância de 200 mm da entrada e a tubagem deve ser envolta em isolamento térmico, o mesmo se aplica ao sensor de medição de temperatura à saída do coletor.

É necessária a medição da velocidade do vento para uma melhor avaliação e controlo de perdas térmicas. Quando a velocidade do vento é inferior a 2 m/s deve-se recorrer a um gerador mecânico de vento, de modo a garantirem-se as condições standard de vento, 3 m/s.

O FTQ usado no ensaio de coletores pode ser água ou outro fluido recomendado pelo fabricante. O calor específico e a densidade do FTQ usado devem ser conhecidos durante os ensaios.

As tubagens e equipamentos usados no circuito necessitam de ser resistentes à corrosão e adequados às temperaturas de ensaio. Estes devem, também, ser adequados ao FTQ em uso. Devem-se isolar as tubagens de modo a reduzir as perdas térmicas no circuito.

O circuito de ensaio deve ter a capacidade de regular e manter constante a temperatura de entrada do FTQ no coletor em qualquer faixa de temperatura de ensaio, visto que variações desta podem adulterar a determinação do desempenho térmico do coletor.

5.2. Procedimento de ensaio

O procedimento efetuado nos ensaios de coletores solares térmicos realizados teve por base o seguimento das recomendações enunciadas pela norma EN 12975-2:2006.

Antes de cada ensaio verificou-se se o coletor e o circuito se encontravam em condições de serem ensaiados, ou seja, sem danos inesperados. A abertura do coletor foi devidamente limpa de modo a permitir que o recetor recebesse a maior quantidade de radiação possível. O enchimento do circuito era feito, e o FTQ colocado em circulação a diferentes fluxos de modo a se purgar o circuito hidráulico, libertando-se assim bolsas de ar. O coletor foi exposto à radiação solar durante 15 minutos, pelo menos, antes de se iniciar a aquisição de dados, de modo a se estabilizar a temperatura dos componentes do coletor, eliminar humidades formadas durante a noite e, também, para estabilização da temperatura dos componentes do piranómetro. Assim os resultados dos ensaios não foram afetados. Contudo, de modo a se obter a estabilização do circuito e com temperatura de entrada no coletor constante demorava-se mais de 15 minutos, assegurando-se assim as especificações supracitadas.

Os ensaios apenas decorreram mediante condições de céu limpo de modo a determinar o desempenho térmico. Aquando o início do ensaio, a irradiância solar incidente no plano do coletor necessitava ser superior a 700 W/m^2 . A componente difusa da irradiância solar foi medida ao fim de cada ensaio, sombreando-se o recetor do piranómetro no plano do coletor, de modo a determinar-se a viabilidade do ensaio, caso a componente difusa excedesse 30% da irradiância solar global incidente no plano do coletor o ensaio tornava-se inviável.

O coletor foi ensaiado em, pelo menos, quatro temperaturas de entrada do FTQ no coletor. Um dos ensaios a água foi feito com a temperatura de entrada a ± 3 K da temperatura ambiente, visando a determinação de η_0 .

Para os ensaios realizados era necessário o conhecimento e aquisição de alguns dados, como:

- Área de abertura, A_a , e área de recepção, A_r ;
- Irradiância hemisférica incidente na abertura do coletor;
- Irradiância solar difusa incidente na abertura do coletor;
- Velocidade do vento a percorrer a abertura do coletor;
- Temperatura ambiente;
- Temperatura do FTQ à entrada e saída do coletor;
- Fluxo de FTQ no circuito e respetiva capacidade térmica (calculada em função da temperatura).

O período de ensaio para a recolha de dados de um coletor solar térmico em regime estacionário é de 15 minutos, visto a constante de tempo do coletor não ser especificada. O coletor era submetido às condições de ensaio, durante pelo menos 15 minutos antes do início do ensaio. No decorrer de cada ensaio, ajustava-se a plataforma onde o coletor estava instalado, de 5 em 5 minutos, de modo a haver seguimento azimutal e em altura solar. Reduzindo-se assim deste modo o efeito de cosseno e captando-se uma potência radiativa solar máxima.

No fim de cada ensaio em que o FTQ era água, esvaziava-se o coletor solar térmico devido às baixas temperaturas sentidas na Herdade da Mitra durante o período noturno no inverno. Como o FTQ, água, tinha de ser puro de modo a saber-se as suas propriedades físicas, não se adicionaram anticongelantes, optando-se pelo referido vazamento do coletor. O coletor foi também coberto com uma lona de modo a não receber radiação em

algum período que não fossem realizados ensaios, para não aquecer até estagnar e danificar os seus componentes.

6. Resultados

Com o desenvolvimento realizado ao nível do circuito de ensaios de coletores solares térmicos e do software, efetuaram-se os ensaios pretendidos de modo a serem recolhidos dados para medição do rendimento de um circuito de ensaios de coletores solares térmicos do tipo CPC a operar com óleo, de modo a compararem-se e compatibilizarem-se os dados obtidos, com os recolhidos para um circuito a água. Compararam-se os dados obtidos em ambos circuitos até 90°C, assegurando-se um grau de confiança compatível com a norma de ensaio de coletores solares térmicos, EN 1975-2:2006, para a faixa de temperaturas de ensaio acima de 100°C.

A realização dos ensaios ocorreu mediante condições anteriormente referidas, ou seja, condições atmosféricas de céu limpo e estáveis, condições estacionárias. Tendo o sistema de se encontrar estável e com a temperatura de entrada do FTQ no coletor estável, à temperatura de ensaio.

Reunidas as condições necessárias, efetuaram-se ensaios com dois FTQs distintos, água e óleo térmico.

Nos ensaios a água obteve-se uma maior estabilidade da temperatura do FTQ à entrada do coletor, em comparação com o óleo. Essa estabilidade pode ser demonstrada, a título de exemplo, pela Figura 29 e pelo Quadro 7 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

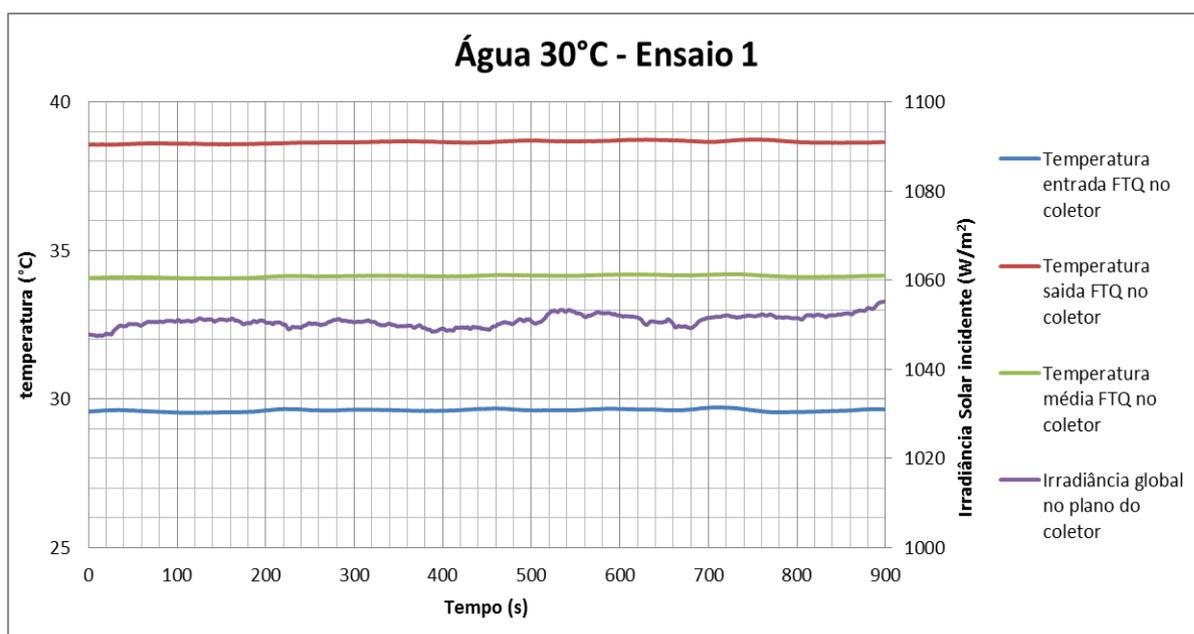


Figura 29 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a água à temperatura de entrada de 30°C

Neste primeiro ensaio a 30°C observa-se que as temperaturas do coletor mantiveram-se praticamente constantes e a irradiância solar global incidente no plano do coletor solar térmico também se manteve bastante constante.

Quadro 8 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a água a uma temperatura de entrada de aproximadamente 30°C

Irradiância (W/m²)	Temp. ambiente (°C)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Temp. média (°C)	Eficiência coletor	
1050,86	18,59	29,62	38,65	34,13	0,79	Média
1,34	0,12	0,04	0,05	0,04	0,06	Desvio
0,13%	0,66%	0,14%	0,12%	0,11%	7,43%	% Erro

A referida estabilidade do ensaio pode ser confirmada pelo Quadro 8, observando-se que os parâmetros em análise tiveram pequenas variações. De relevar a estabilidade do FTQ à entrada do coletor, obtendo-se desvios dentro dos valores permitidos, $\pm 0,1^\circ\text{C}$, pela norma de ensaio de coletores solares térmicos.

Os ensaios a óleo tiveram uma estabilidade inferior aos ensaios a água tendo uma variação superior, aproximadamente $\pm 0,2^\circ\text{C}$. A temperatura de entrada deste FTQ relevou-se mais difícil de controlar, devido ao seu baixo calor específico, dado em função da temperatura por:

$$C_p(T) = 3,571T + 1807,6 \quad 6.1$$

Sendo o calor específico do óleo aproximadamente metade do calor específico da água, captando e perdendo calor mais facilmente, tornando-se o controlo temperatura à entrada do coletor mais difícil. A estabilidade dos ensaios a óleo demonstra-se pela Figura 30.

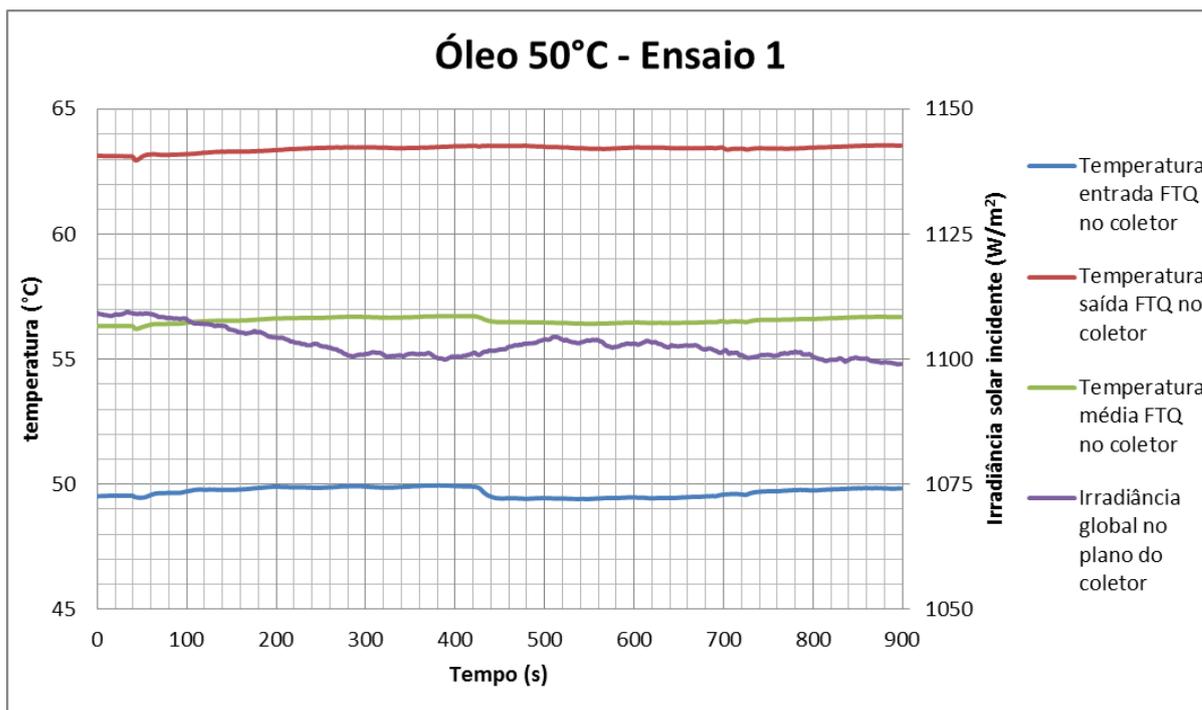


Figura 30 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a óleo à temperatura de entrada de 50°C

No primeiro ensaio a óleo aos 50°C observa-se a estabilidade alcançada para a temperatura de entrada do FTQ no coletor. As condições atmosféricas também se mantiveram dentro de parâmetros aceitáveis, como se pode comprovar pelo Quadro 9.

Quadro 9 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a óleo a uma temperatura de entrada de aproximadamente 50°C

Irradiância (W/m ²)	Temp. ambiente (°C)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Temp. média (°C)	Eficiência coletor	
1102,91	20,78	49,70	63,43	56,56	0,65	Média
2,75	0,18	0,18	0,12	0,12	0,02	Desvio
0,25%	0,86%	0,37%	0,19%	0,21%	2,32%	% Erro

Determinaram-se e compararam-se as eficiências do coletor solar térmico do tipo CPC por dois métodos: tradicional e calorimétrico. O método tradicional consiste na medição separada de parâmetros e recorrendo-se à equação 2.32 determina-se a eficiência real, η_{real} . O método calorimétrico baseou-se em [3], usando-se um calorímetro em série com o circuito de ensaio de coletores, determinando-se a eficiência pela equação 2.42, sendo o produto do caudal pelo calor específico, $\dot{m}C_p$, dado pela equação 2.46. Deste modo, obtiveram-se as eficiências apresentadas na Figura 31.

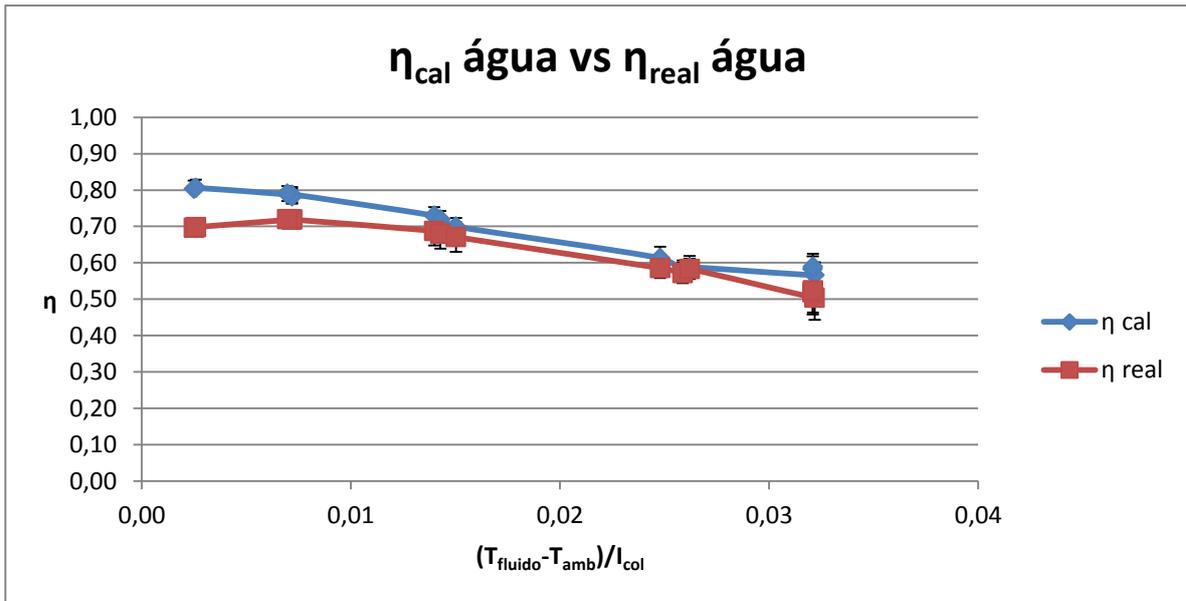


Figura 31 - Eficiência calorimétrica e eficiência real para ensaios a água

A temperatura do fluido, T_{fluido} , é dada pela temperatura média entre a entrada e saída do coletor.

Constata-se que os valores são próximos, existindo contudo diferenças a temperaturas mais baixas, nomeadamente à temperatura ambiente e aos 30°C, a baixas temperaturas de ensaio torna-se mais difícil a estabilização da temperatura do calorímetro, tendo este sido desenhado para altas temperaturas de ensaio. Deste modo comprova-se o funcionamento da técnica calorimétrica apresentada em [3].

Procedeu-se ao mesmo cálculo para o óleo, e compararam-se as eficiências calorimétricas de ambos FTQs, pela Figura 32.

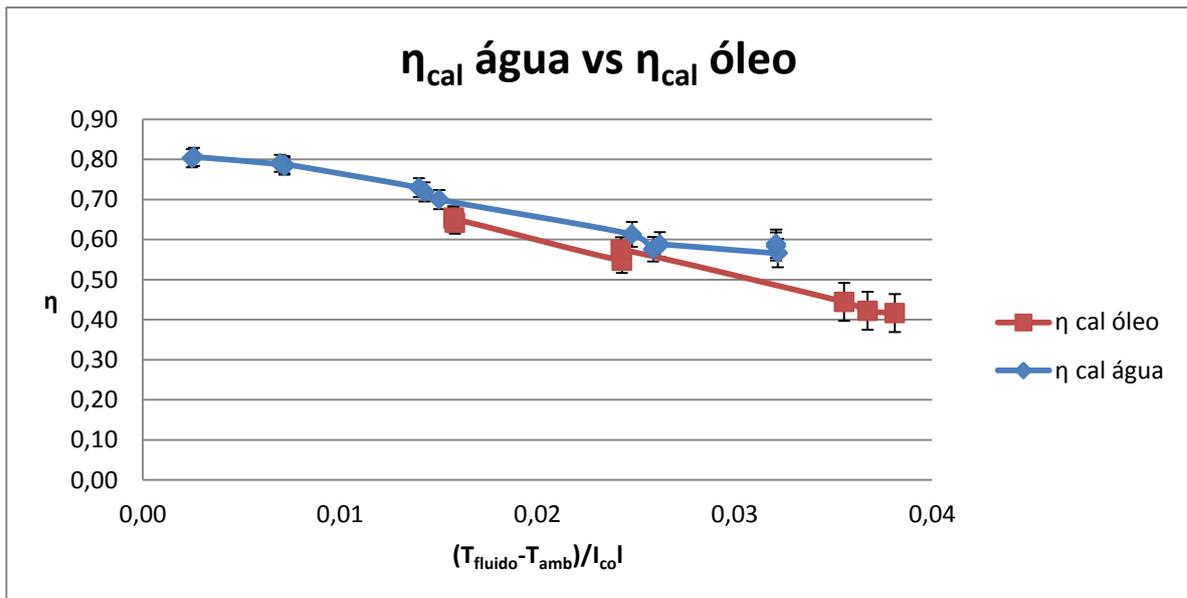


Figura 32 - Eficiência calorimétrica para ensaios a água e óleo

Constata-se que para a água e óleo, recorrendo-se a técnicas calorimétricas as eficiências do coletor são compatíveis até aos 90°C. O desfasamento entre os últimos pontos da eficiência do coletor a água e a óleo deve-se ao ensaio da água ter sido realizado a 85°C e o de óleo a 90°C, para a entrada do FTQ no coletor.

Contudo existem diferenças nas eficiências obtidas. As possíveis justificações das diferenças podem ser:

- Imprópria estabilização da temperatura do circuito;
- Degradação dos aparelhos de medida, nomeadamente da resistência equivalente para a determinação da potência dissipada pelo calorímetro;
- Coletor solar térmico do tipo CPC em más condições, sendo um protótipo e podendo ter sido afetado pelas condições meteorológicas muito adversas, durante o período de medidas.

O método tradicional do cálculo da eficiência, obtido com recurso ao caudal medido pelo caudalímetro e o calor específico dado pela curva do fabricante, seria ineficiente para a determinação da eficiência aquando da utilização de óleo como FTQ é ineficiente, como se pode comprovar pela Figura 33. Comprovando-se que recorrendo a técnicas calorimétricas, calorímetro, se conseguem obter resultados compatíveis para o óleo, em relação à água.

Sendo assim de se prever que este comportamento permaneça para temperaturas de entrada de óleo no coletor acima de 100°C.

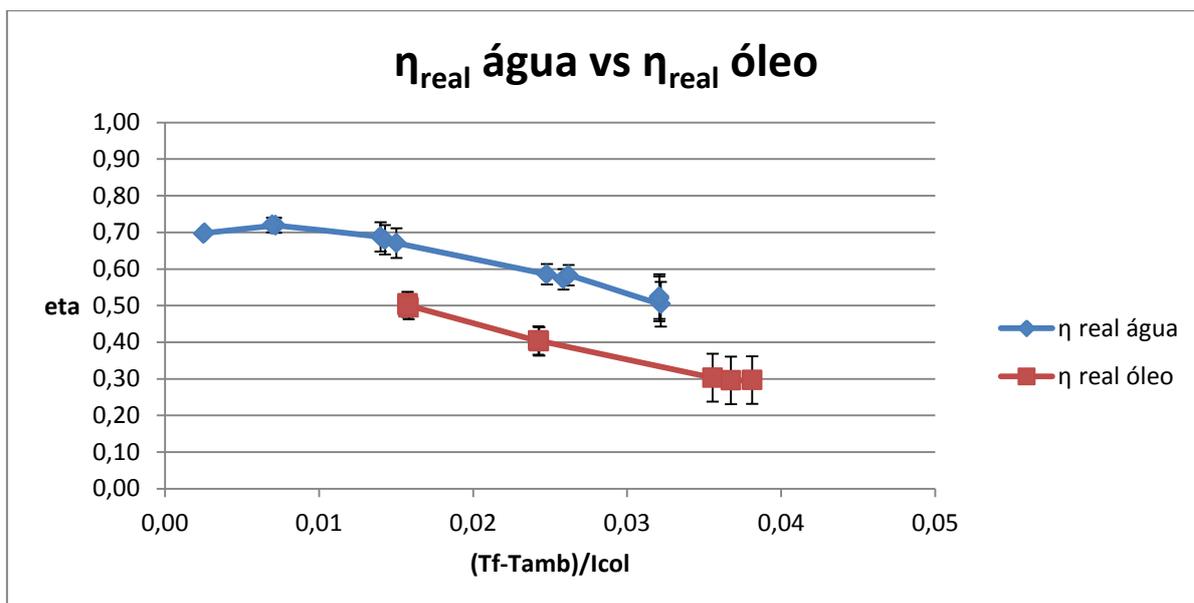


Figura 33 - Eficiência real para ensaios a água e óleo

No Quadro 10, encontram-se as eficiências obtidas com recurso ao método calorimétrico e ao método tradicional, real, em função das faixas de temperatura de ensaio, sendo estes resultados correspondentes aos ensaios de água apresentados na Figura 31.

Quadro 10 - Eficiências calorimétricas e reais obtidas para água, para as respetivas faixas de temperatura de ensaio.

	Temperatura ambiente	30°C	50°C	70°C	90°C
η_{cal}	0,80	0,79	0,73	0,61	0,57
	0,81	0,78	0,72	0,58	0,58
	-	0,79	0,70	0,59	0,59
η_{real}	0,70	0,72	0,69	0,59	0,50
	0,70	0,72	0,68	0,57	0,52
	-	0,72	0,67	0,58	0,52

As eficiências obtidas para os ensaios a óleo, com recurso à calorimetria e ao processo tradicional, em função das faixas de temperatura de ensaio, encontram-se no Quadro 11. Sendo estes resultados correspondentes às eficiências do óleo apresentadas na Figura 32 e na Figura 33.

Quadro 11 - Eficiências calorimétricas e reais obtidas para óleo, para as respectivas faixas de temperatura de ensaio.

	50°C	70°C	90°C
η cal	0,65	0,55	0,44
	0,64	0,58	0,42
	0,65	-	0,42
η real	0,51	0,4	0,3
	0,49	0,4	0,3
	0,5	-	0,3

Os ensaios realizados a óleo não excederam a temperatura de entrada no coletor de 90°C por diversos motivos:

- Instabilidade da rede elétrica da Herdade da Mitra, não permitindo o funcionamento da fonte de tensão e conseqüentemente do calorímetro;
- Más condições atmosféricas, muitos dias nublados nos últimos meses, para as condições necessárias de ensaio de coletores solares térmicos, de acordo com o método de ensaio estacionário;
- Por fim, ocorreram problemas de natureza mecânica com a bomba de circulação de óleo que não serão solucionáveis num futuro próximo.

A conjugação dos fatores supracitados levou a que apenas existam dados de eficiência até aos 90°C para óleo, sendo o último o principal para a não existência de ensaios acima dos 100°C.

Contudo, quando solucionado o problema mecânico da bomba pretende-se dar continuidade aos ensaios a óleo para faixas de temperatura acima dos 100°C, nomeadamente para os 110°C, 130°C e 150°C, visando a publicação de um artigo de carácter científico em continuidade do trabalho desenvolvido em [3], comprovando-se a fiabilidade da aplicação de métodos calorimétricos para a determinação de eficiência de coletores solares térmicos a operar com um FTQ que não água.

Em adição, no Anexo 6, encontram-se os ângulos solares calculados para o período correspondente aos ensaios realizados, com base no subcapítulo 2.2. As velocidades de vento medidas ao longo dos ensaios, medidas ao início e final do ensaio, encontram-se no Anexo 7.

7. Conclusões

A presente dissertação teve como finalidade a continuidade do trabalho apresentado em [3], visando a demonstração da fiabilidade de técnicas calorimétricas, com recurso ao calorímetro desenvolvido [3], para a determinação da eficiência de coletores solares térmicos a operar com um FTQ diferente de água.

O trabalho proposto contemplava o desenvolvimento de um circuito de ensaios de coletores solares térmicos a óleo, tendo esse circuito sido desenvolvido. Pretendia-se cumprir os requisitos especificados pela norma europeia de ensaios de coletores solares térmicos, EN 12975-2:2006, para as características do circuito. Contudo, não se conseguiu alcançar a estabilidade da temperatura de entrada de óleo no coletor com variações aceitáveis, $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, tendo-se conseguido temperaturas de entrada com variações de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, sendo necessário melhorar o circuito neste aspeto. Esta variação poderá ser reduzida com maiores períodos de estabilização da temperatura do FTQ no circuito e com a introdução de um outro depósito de inércia, permitindo uma maior estabilidade da temperatura do circuito.

O circuito não dispõe de gerador mecânico de vento, pelo que será necessário de modo a ser garantido vento a percorrer a abertura do coletor com velocidade de 3 m/s, como requerido pela EN 12975-2:2006.

Todavia, apesar do circuito desenvolvido não se encontrar de acordo com todos os requisitos da EN 12975-2:2006, realizaram-se ensaios a um coletor solar térmico do tipo CPC, determinando-se a sua eficiência para água e óleo, de modo a compararem-se dados. Tendo-se constatado que a tendência da medida é idêntica e se encontra relacionada, como se esperava. Esta constatação é possível pela análise da Figura 32, onde se observa a mesma tendência para a eficiência de ambos FTQs, contudo o último conjunto de pontos de eficiência da água seria de se esperar que estivesse mais abaixo, pelo que as condições de ensaio podem não ter sido as melhores. O calorímetro permite uma medida mais fiável que o método tradicional, como se pode comprovar pelas figuras apresentadas para o rendimento calorimétrico e rendimento real. Deste modo considera-se que o calorímetro é um equipamento adequado para a determinação de eficiência térmica de coletores a operar acima dos 100°C , dada a relação apresentada.

Um fator que pode influenciar as medidas obtidas é a própria calibração do calorímetro, visto que esta contempla vários fluxos de FTQ, enquanto os ensaios do coletor se efetuaram com um fluxo fixo, podendo, eventualmente, ser melhorada pela calibração efetuada para o fluxo de ensaio.

Numa próxima versão do calorímetro seria aconselhável a integração de um misturador, de modo a evitar a estratificação do fluido e acelerar o processo de estabilização da temperatura deste e, conseqüentemente, do circuito. Esta estabilização é por vezes morosa, sendo uma adição aconselhável.

As condições do coletor CPC ensaiado não foram as melhores, visto que possuía refletores deformados, continha sujidade na face interior do e vidro e não se encontrava devidamente isolado visto que tinha parte do vidro descolado, adulterando assim as eficiências obtidas, face a um CPC em bom estado.

Uma significativa melhoria efetuada no circuito foi o controlo fino de frio, por intermédio do controlo de um variador de frequência com recurso ao software desenvolvido e a um Arduino. Este controlo fino de frio permitiu um controlo mais fácil da temperatura do FTQ à entrada do coletor e sem necessidade de recorrer a um potenciômetro manual, cujo ajuste pode não ser o mais preciso.

A introdução de uma fonte de alimentação contínua foi uma melhoria em relação a [3] visto que a rede da Herdade da Mitra é bastante instável, permitindo uma determinação mais precisa da potência dissipada pela resistência do calorímetro para o FTQ. Contudo, a introdução desta fonte trouxe problemas adicionais, quando as fases da rede elétrica da Herdade da Mitra se encontravam desequilibradas esta ativava um modo de proteção e não funcionava, impedindo a realização de ensaios.

Existiram outros problemas adicionais que condicionaram a obtenção de resultados, nomeadamente os meses iniciais de 2014 terem sido bastante nublados, com poucos períodos possíveis de teste e por, recentemente, a bomba de circulação de óleo ter apresentado problemas de natureza mecânica que não serão solucionáveis num futuro próximo. Outro fator limitativo na realização de ensaios foi o fato da altura solar no inverno ser mais baixa, necessitando-se uma maior inclinação do coletor que possível, visto que a

plataforma ter uma inclinação máxima de 66. Assim, o período em que se conseguia ter irradiância direta normal incidente na superfície do coletor era mais restrito, dificultando a realização de ensaios.

Contudo, pretende-se dar seguimento ao trabalho proposto, quando reparada/substituída a bomba de circulação de óleo, de modo a recolherem-se mais dados e ser escrito e publicado um artigo de caráter científico.

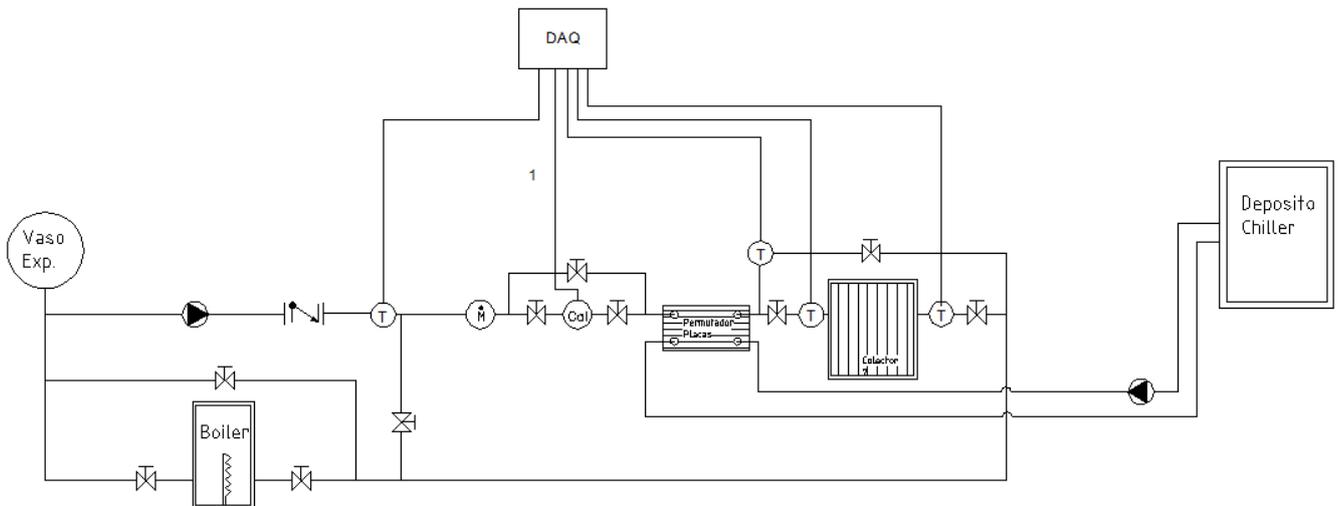
8. Bibliografia

- [1] Barroso, Héctor; Sanz, Francisco; Hernández, Miguel; Pereira, Daniel; Rayo, Daniel; Serrano, Enrique, "Understanding of the HTF Degradation on Parabolic Trough Power Plant Energy Performance," , Marrakech, 2012.
- [2] "EN 12975-2 (draft)," 2006.
- [3] J.Marchã; T.Osório; Pereira, M. Collares; P.Horta, "Development and test results of a calorimetric technique for solar thermal testing loops, enabling mass flow and Cp measurements independent from fluid properties of the HTF used," *Energy Procedia*, 2013.
- [4] Energy Information Administration, "INTERNATIONAL ENERGY OUTLOOK 2013," 2013.
- [5] C. Julian Chen, *Physics of Solar Energy*. Columbia University: Wiley, 2011.
- [6] Soteris A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 2nd ed.: Academic Press, 2014.
- [7] ASHRAE, *Handbook of HVAC Applications*. Atlanta: ASHRAE, 2007.
- [8] F., Kreider, J.F. Kreith, *Principles of Solar Engineering*. New York: McGraw-Hill, 1978.
- [9] J.A., Beckman, W.A. Duffie, *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- [10] ASHRAE, *Procedure for Determining Heating and Cooling Loads for Computerizing Energy Calculations*. Atlanta: ASHRAE, 1975.
- [11] A.B, Meinel, M.P. Meinel, *Applied Solar Energy - An Introduction*. Reading: Addison - Wesley, 1976.
- [12] "Introduction to Calorimetry," North Carolina School of Science & Mathematics, 1996.
- [13] John A. Duffie and William A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd ed.: JOHN WILEY & SONS, INC., 1980.
- [14] Ari Rabl, "Comparison of Solar Concentrators," vol. 18, p. 93, 1976.
- [15] Maria João Carvalho Manuel Collares Pereira, "Dimensionamento de sistemas solares - Sistemas de Aquecimento de Água," LNETI/DER, 1990.
- [16] TÜV Rheinland. (2014, Março) Solar Keymark - Thermal solar systems and components — Solar collectors : Test methods. [Online]. <http://www.dincertco.de/logos/011-7S1834%20F.pdf>
- [17] MCG. (2014, Março) Colector térmico CPC PowerST1. [Online]. http://www.mcg.pt/uploads/cms/20110429101929_monofolha_solar_06.pdf
- [18] BP. (2014, Março) Transcal N - Heat Transfer Oil. [Online]. http://www.lubricantsonline.co.za/uploads/337865306_Transcal_N_09_2003.pdf
- [19] E.R.G, Drake, R.M. Eckert, *Analysis of Heat and Mass Transfer*.: McGraw Hill Higher Education, 1972.
- [20] Seeedstudio. (2014, Março) Seeedduino Stalker v2.1 - Datasheet. [Online]. http://www.seeedstudio.com/wiki/Seeedduino_Stalker_v2.1
- [21] Agilent. (2014, Março) Agilent 34980A Datasheet. [Online]. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-1437EN.pdf>

9. Anexos

9.1. Anexo 1

Esquema Unifilar representativo do circuito hidráulico do circuito de ensaio de coletores solares térmicos, a água, com sondas de aquisição de dados e respetiva simbologia usada. Esquema não elaborado à escala.

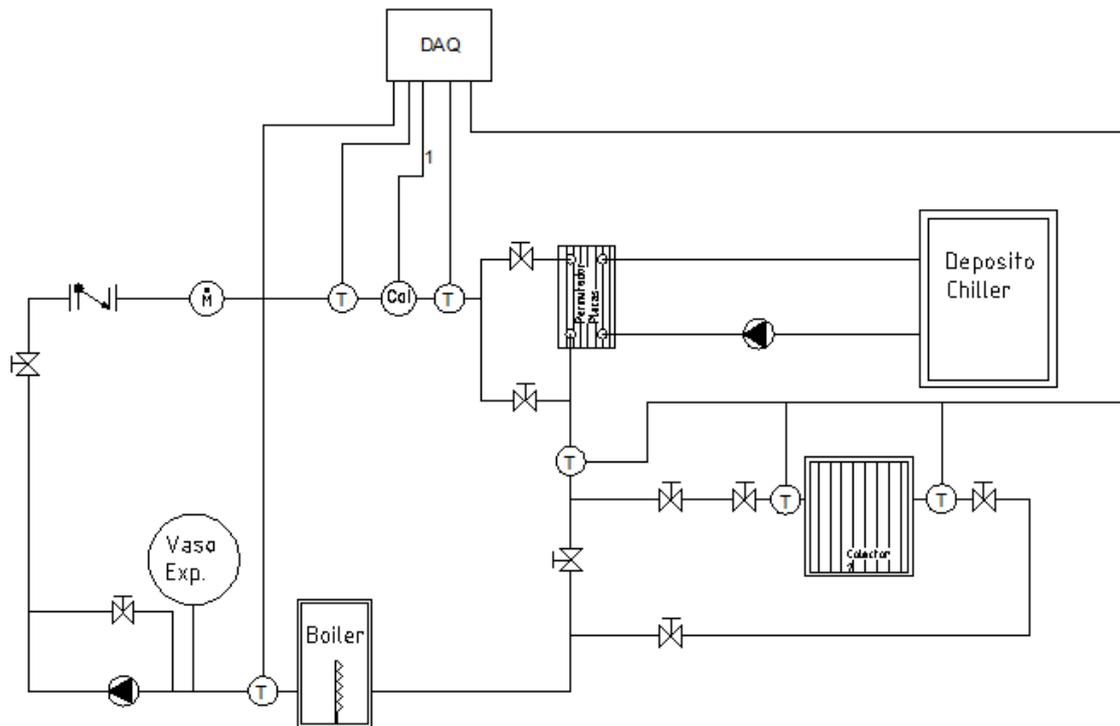


Simbologia	
	Bomba de circulação
	Caudalímetro
	Calorímetro
	Valvula de corte
1	Medição corrente calorímetro
	Sensor de Temperatura
	Válvula de retenção
DAQ	Sistema Aquisição dados

Figura 34 - Esquema Unifilar representativo do circuito hidráulico do circuito de ensaio de coletores solares térmicos a água

9.2. Anexo 2

Esquema Unifilar representativo do circuito hidráulico do circuito de ensaio de coletores solares térmicos, a óleo, com sondas de aquisição de dados e respetiva simbologia usada. Esquema não elaborado à escala



Simbologia	
	Bomba de circulação
	Caudalímetro
	Calorímetro
	Valvula de corte
1	Medição corrente calorímetro
	Sensor de Temperatura
	Válvula de retenção
DAQ	Sistema Aquisição dados

Figura 35 - Esquema Unifilar representativo do circuito hidráulico do circuito de ensaio de coletores solares térmicos a óleo

9.3. Anexo 3

Esquema representativo do circuito elétrico existente para ambos os circuitos de ensaios de coletores solares térmicos.

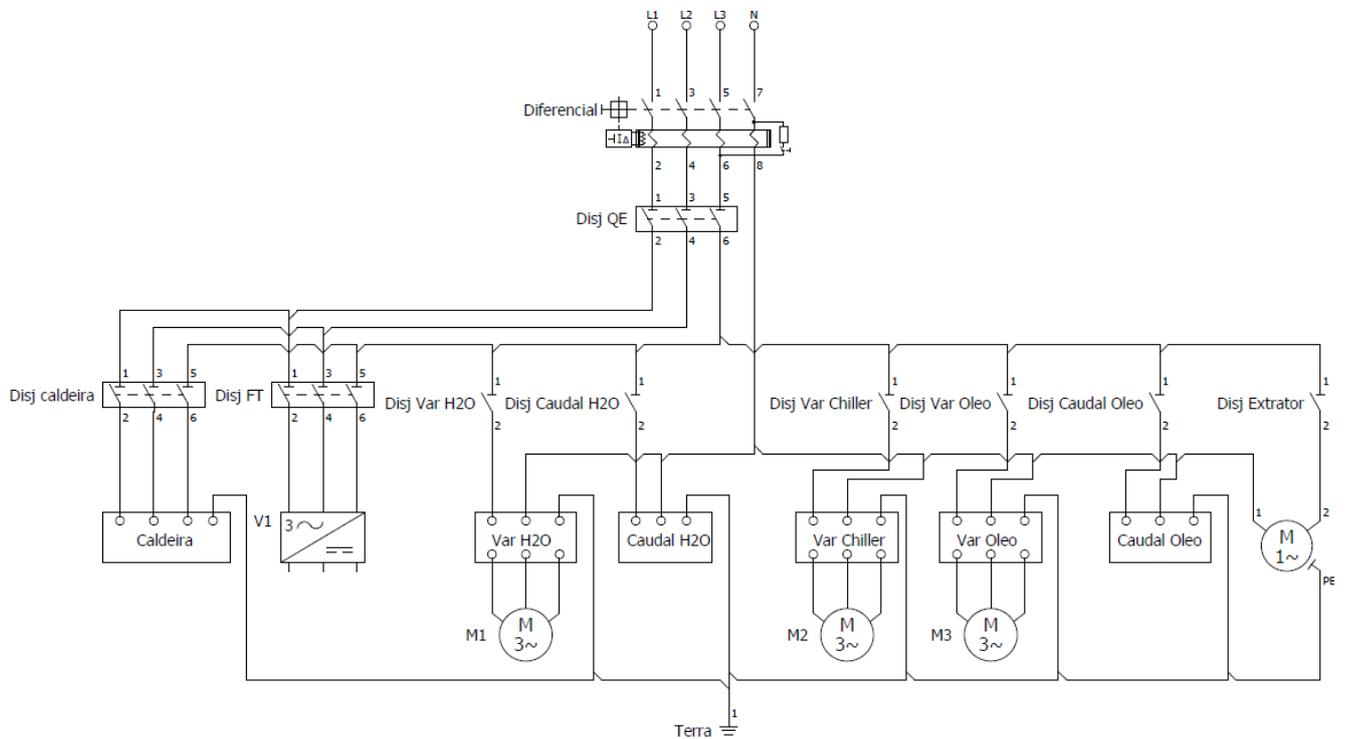


Figura 36 - Esquema representativo do circuito elétrico

9.4. Anexo 4

Quadro 12 - Constantes de calibração de sondas de temperatura do tipo pt100 calibradas.

Sonda	Constante de calibração
Sonda 1	$-236,164218+2,202808*R1+0,001605*R1^2$
Sonda 2	$-247,147949+2,382219*R2+0,000884*R2^2$
Sonda 3	$-240,582003+2,276477*R3+0,001281*R3^2$
Sonda 4	$-244,071219+2,340596*R4+0,000997*R4^2$
Sonda 5	$-249,805338+2,453642*R5+0,000480*R5^2$
Sonda 6	$-251,870108+2,456050*R6+0,000633*R6^2$
Sonda 7	$-235,452376+2,213042*R7+0,001501*R7^2$
Sonda 8	$-224,581919+2,013496*R8+0,002378*R8^2$

9.5. Anexo 5

Figuras com os dados recolhidos, a cada faixa de temperatura de ensaio, dispostos graficamente e respetivos quadros resumo.

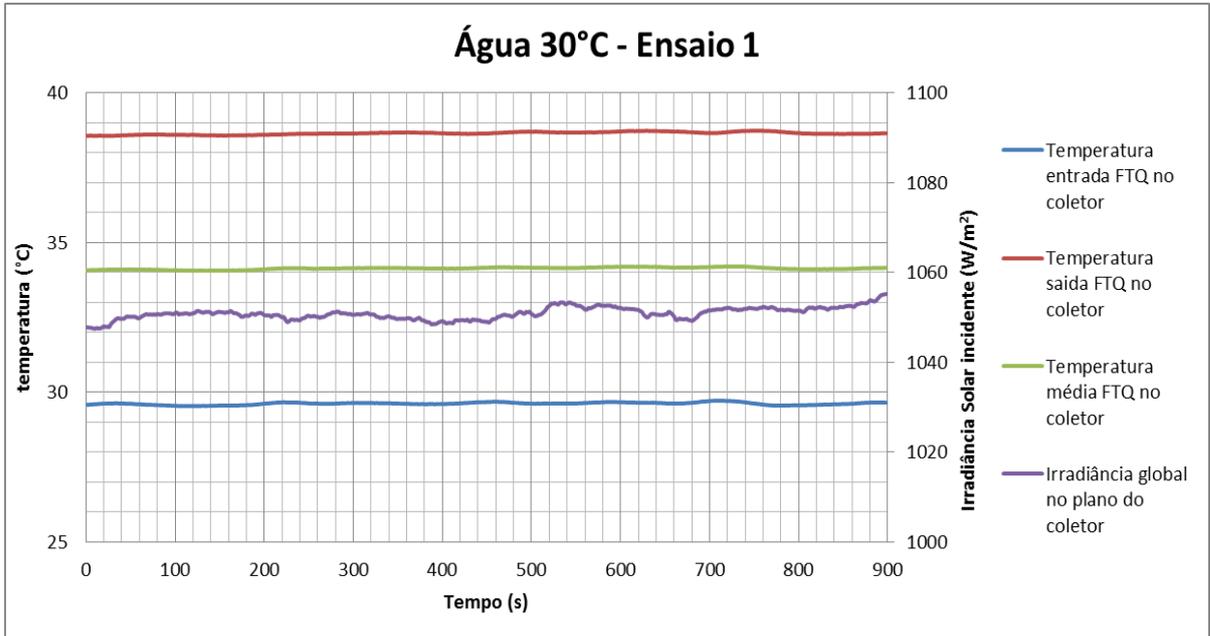


Figura 37 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a água à temperatura de entrada de 30°C

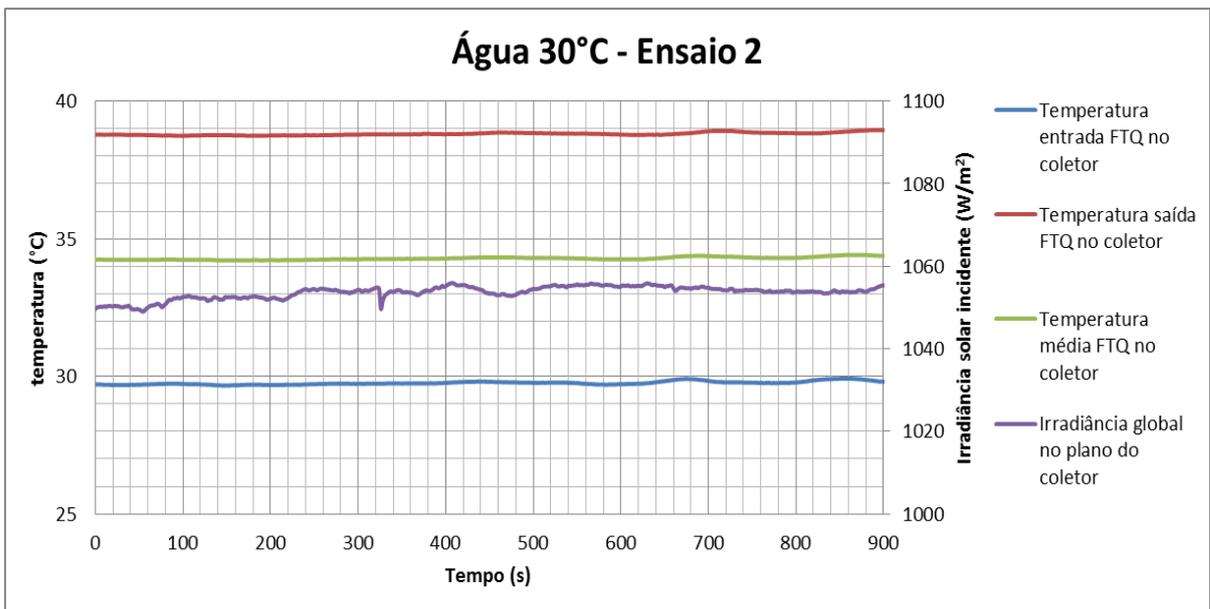


Figura 38 - Dados recolhidos do segundo ensaio a água à temperatura de entrada de 30°C

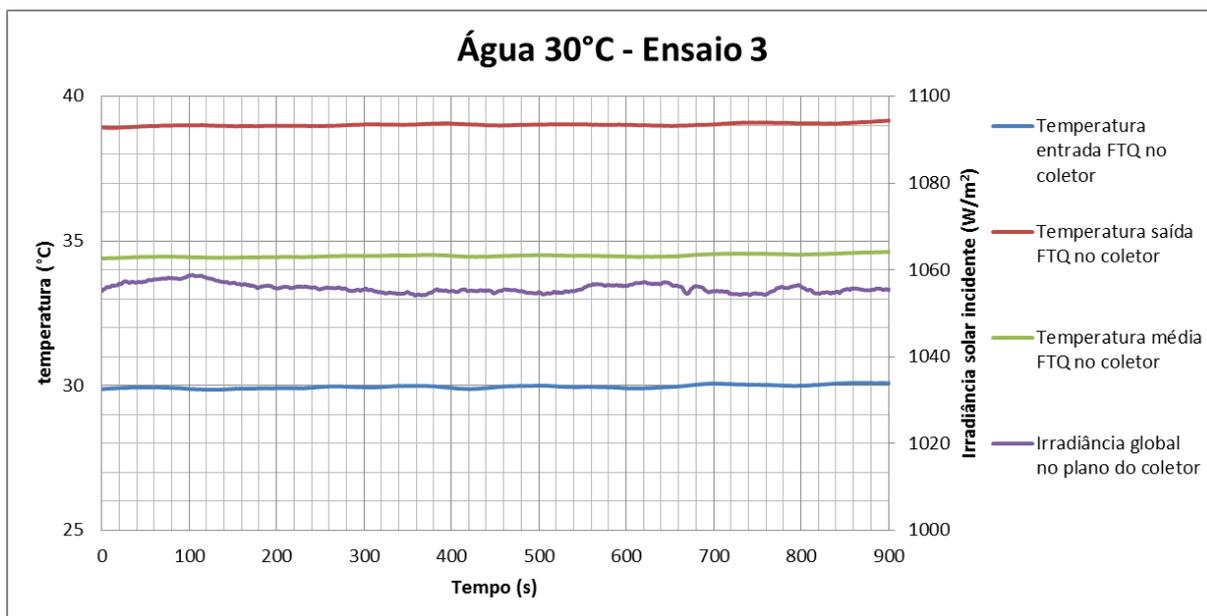


Figura 39 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a água à temperatura de entrada de 30°C

Quadro 13 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a água a uma temperatura de entrada de aproximadamente 30°C

	Irradiância (W/m ²)	Temp. ambiente (°C)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Temp. média (°C)	Eficiência coletor	
Ensaio 1	1050,86	18,59	29,62	38,65	34,13	0,79	Média
	1,34	0,12	0,04	0,05	0,04	0,06	Desvio
	0,13%	0,66%	0,14%	0,12%	0,11%	7,43%	% Erro
Ensaio 2	1053,89	18,70	29,76	38,82	34,29	0,78	Média
	1,61	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	Desvio
	0,15%	0,31%	0,20%	0,14%	0,15%	7,42%	% Erro
Ensaio 3	1055,81	19,36	29,97	39,03	34,50	0,79	Média
	1,06	0,25	0,07	0,05	0,06	0,06	Desvio
	0,10%	1,27%	0,22%	0,14%	0,16%	7,58%	% Erro

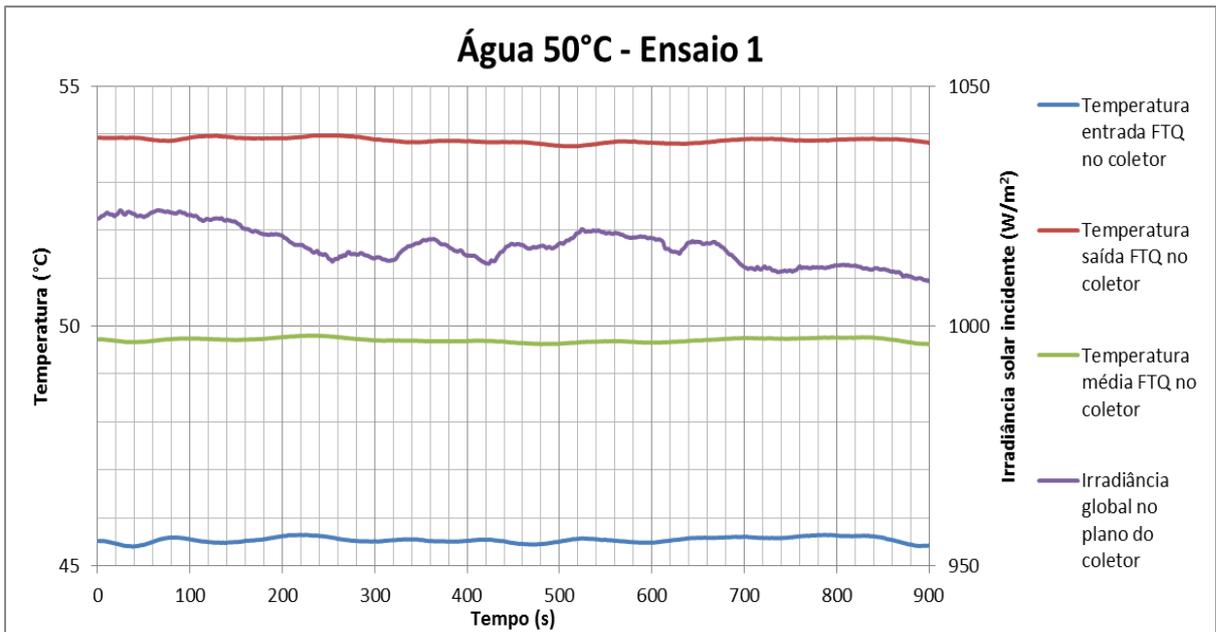


Figura 40 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a água à temperatura de entrada de 50°C

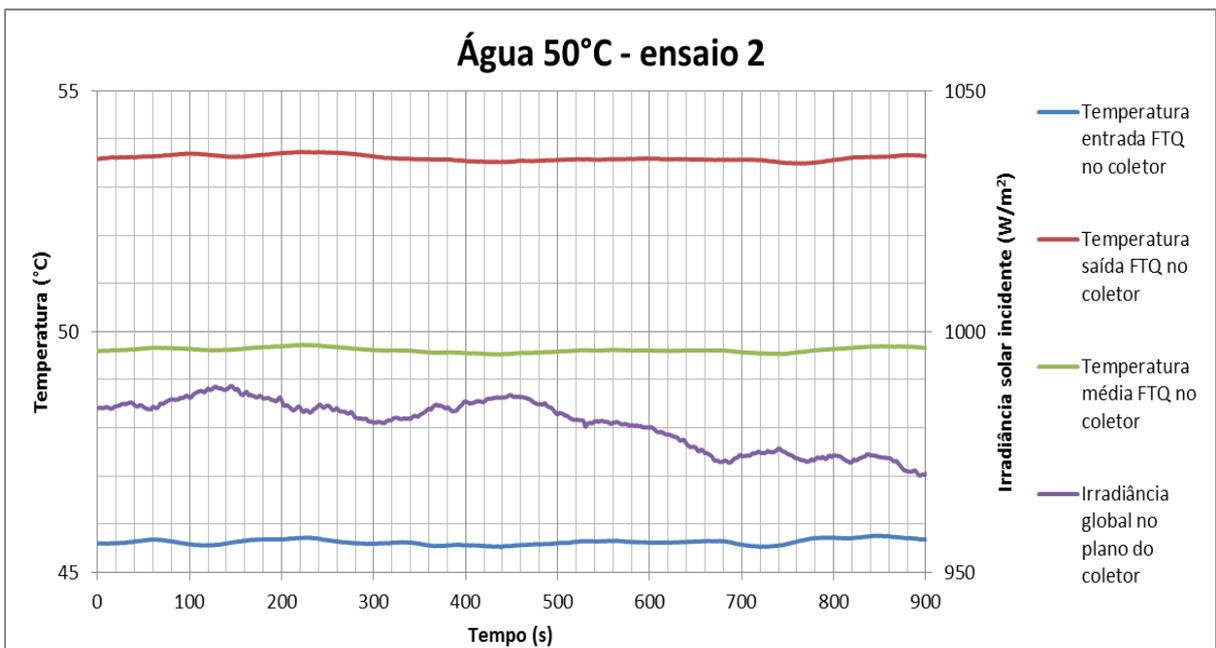


Figura 41 - Dados recolhidos do segundo ensaio a água à temperatura de entrada de 50°C

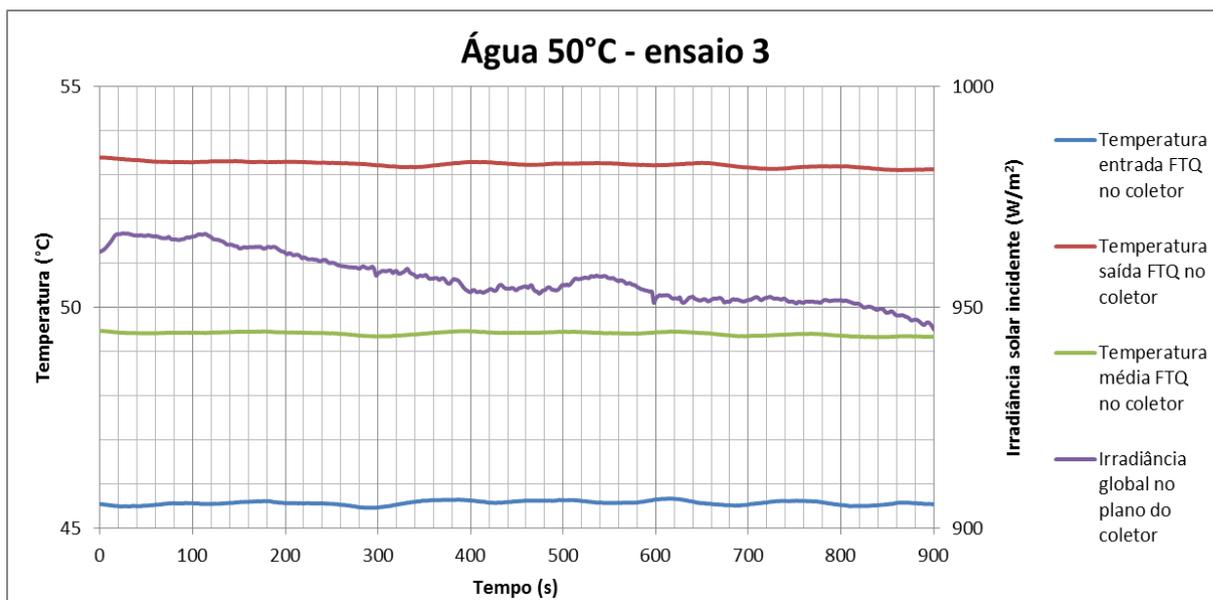


Figura 42 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a água à temperatura de entrada de 50°C

Quadro 14 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a água a uma temperatura de entrada de aproximadamente 50°C

	Irradiância (W/m ²)	Temp. ambiente (°C)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Temp. média (°C)	Eficiência coletor	
ensaio 1	1016,35	20,41	45,54	53,87	49,71	0,73	Média
	4,16	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	Desvio
	0,41%	0,26%	0,13%	0,10%	0,09%	8,04%	% Erro
ensaio 2	1001,85	20,19	45,59	53,72	49,66	0,73	Média
	4,95	0,06	0,07	0,06	0,06	0,05	Desvio
	0,49%	0,31%	0,15%	0,12%	0,12%	7,35%	% Erro
ensaio 3	979,28	20,17	45,64	53,60	49,62	0,72	Média
	6,16	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	Desvio
	0,63%	0,26%	0,12%	0,10%	0,09%	6,76%	% Erro

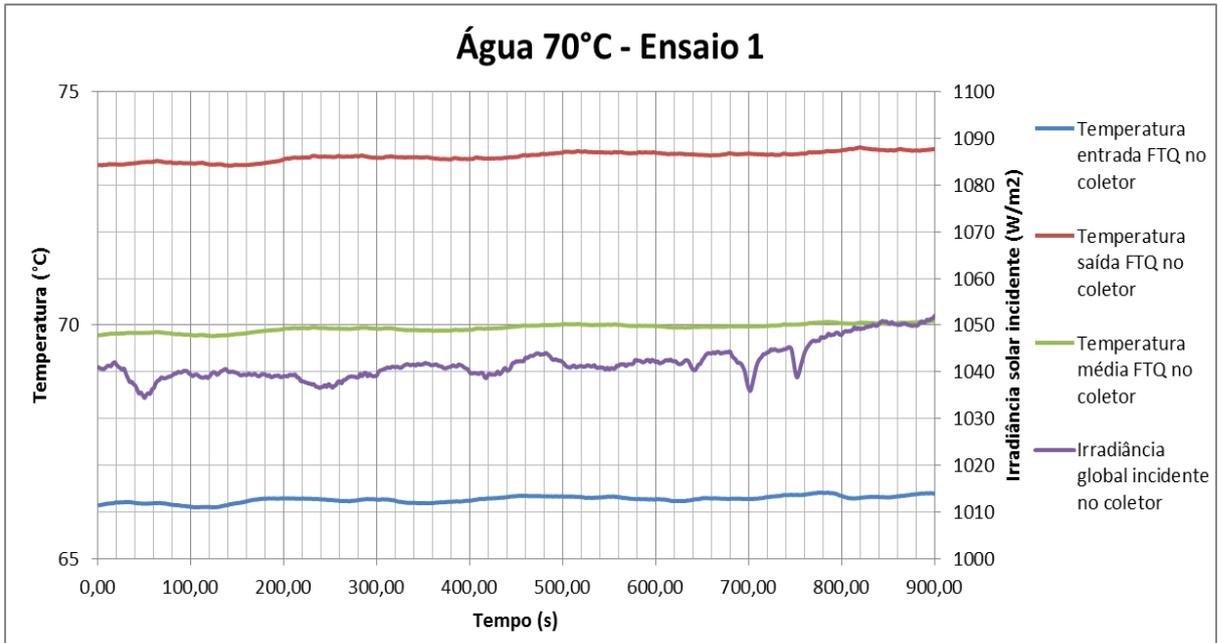


Figura 43 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a água à temperatura de entrada de 70°C

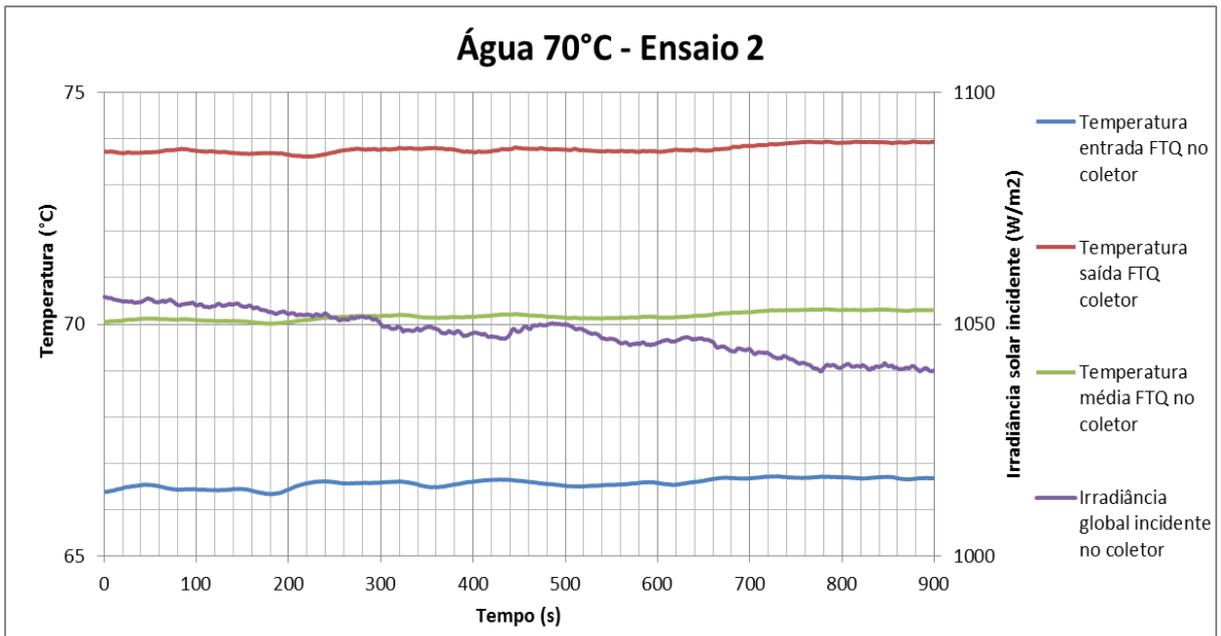


Figura 44 - Dados recolhidos do segundo ensaio a água à temperatura de entrada de 70°C

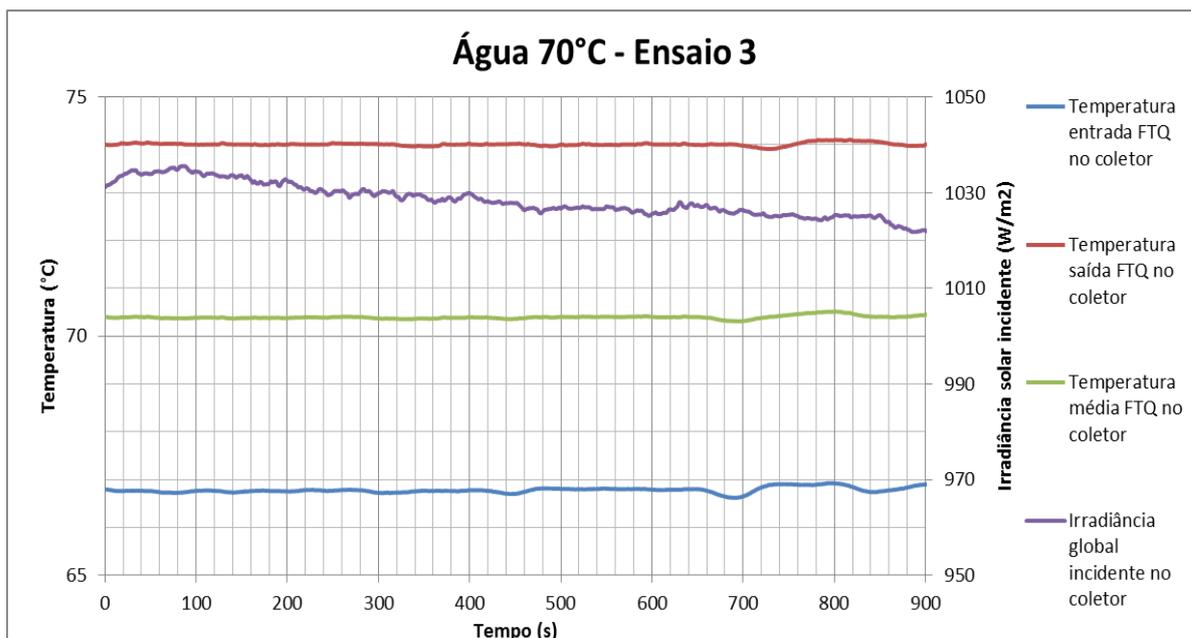


Figura 45 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a água à temperatura de entrada de 70°C

Quadro 15 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a água a uma temperatura de entrada de aproximadamente 70°C

	Irradiância (W/m ²)	Temp. ambiente (°C)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Temp. média (°C)	Eficiência coletor	
Ensaio1	1042,19	16,73	66,27	73,62	69,95	0,61	Média
	3,93	0,10	0,07	0,10	0,08	0,03	Desvio
	0,38%	0,62%	0,11%	0,14%	0,12%	5,09%	% Erro
Ensaio2	1047,45	14,37	66,58	73,79	70,18	0,58	Média
	5,12	0,10	0,10	0,09	0,09	0,04	Desvio
	0,49%	0,68%	0,15%	0,12%	0,13%	6,74%	% Erro
Ensaio3	1028,04	14,91	66,79	74,01	70,40	0,59	Média
	3,76	0,11	0,06	0,03	0,04	0,04	Desvio
	0,37%	0,73%	0,09%	0,04%	0,05%	7,24%	% Erro

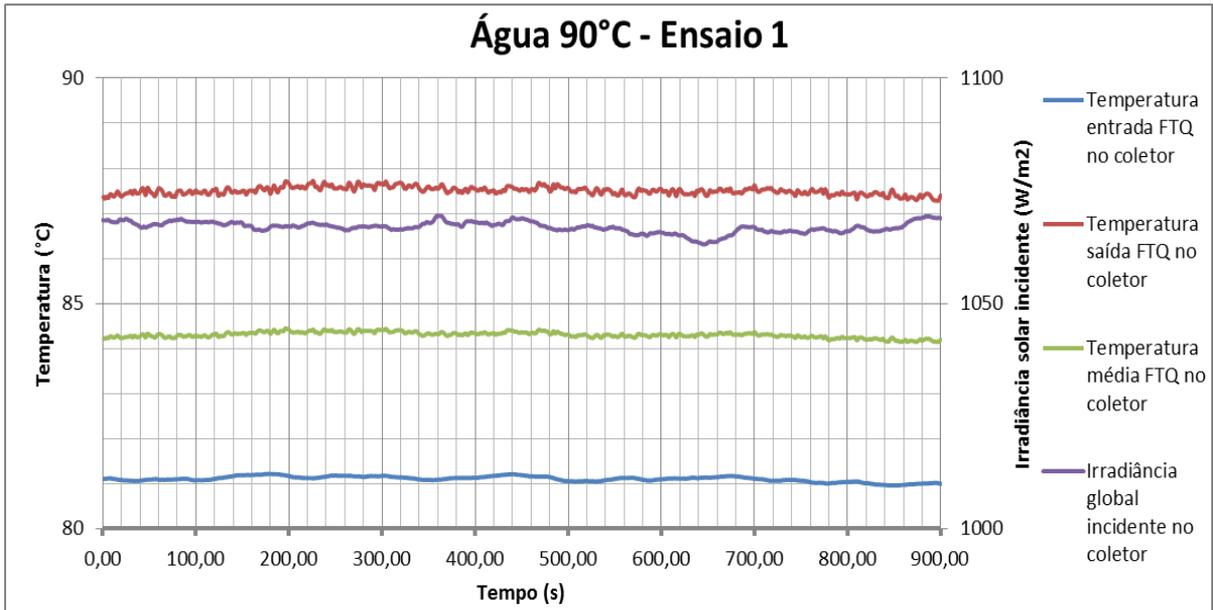


Figura 46 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a água à temperatura de entrada de 90°C

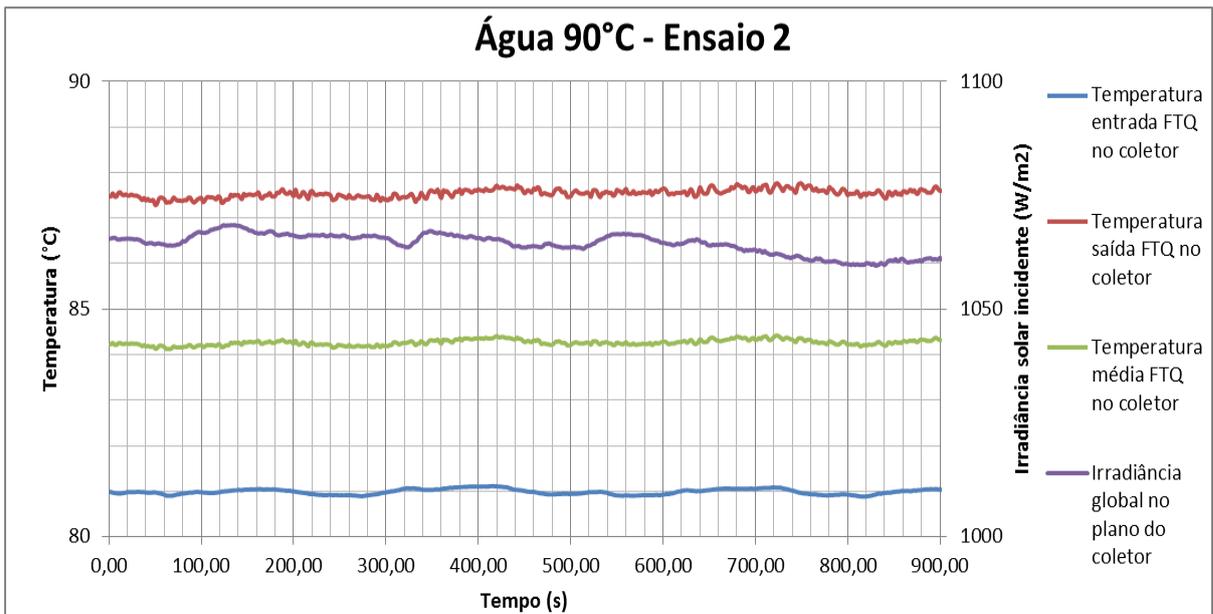


Figura 47 - Dados recolhidos do segundo ensaio a água à temperatura de entrada de 90°C

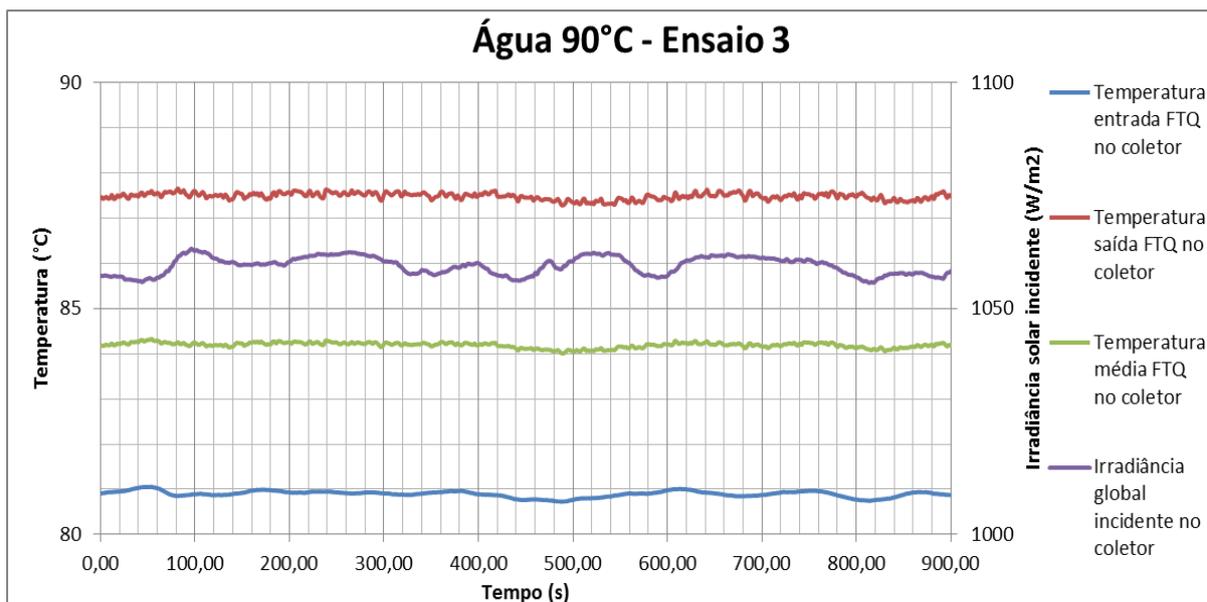


Figura 48 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a água à temperatura de entrada de 90°C

Quadro 16 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a água a uma temperatura de entrada de aproximadamente 90°C

	Irradiância (W/m ²)	Temp. ambiente (°C)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Temp. média (°C)	Eficiência coletor	
Ensaio1	1066,97	13,57	81,11	87,50	84,30	0,50	Média
	1,22	0,14	0,06	0,08	0,06	0,02	Desvio
	0,11%	1,02%	0,07%	0,10%	0,08%	4,59%	% Erro
Ensaio2	1064,18	13,92	80,99	87,55	84,27	0,52	Média
	2,35	0,10	0,06	0,09	0,06	0,02	Desvio
	0,22%	0,73%	0,07%	0,10%	0,07%	4,07%	% Erro
Ensaio3	1059,32	14,15	80,90	87,49	84,19	0,52	Média
	1,88	0,12	0,07	0,07	0,06	0,02	Desvio
	0,18%	0,86%	0,08%	0,08%	0,07%	4,47%	% Erro

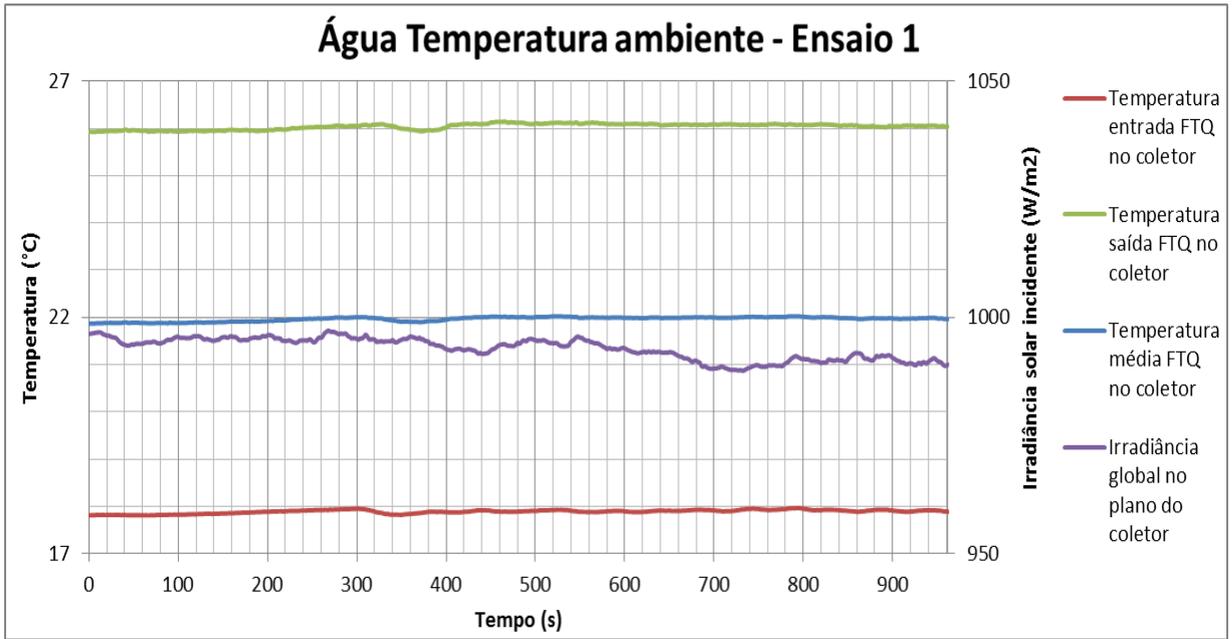


Figura 49 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a água à temperatura de entrada acima da temperatura ambiente

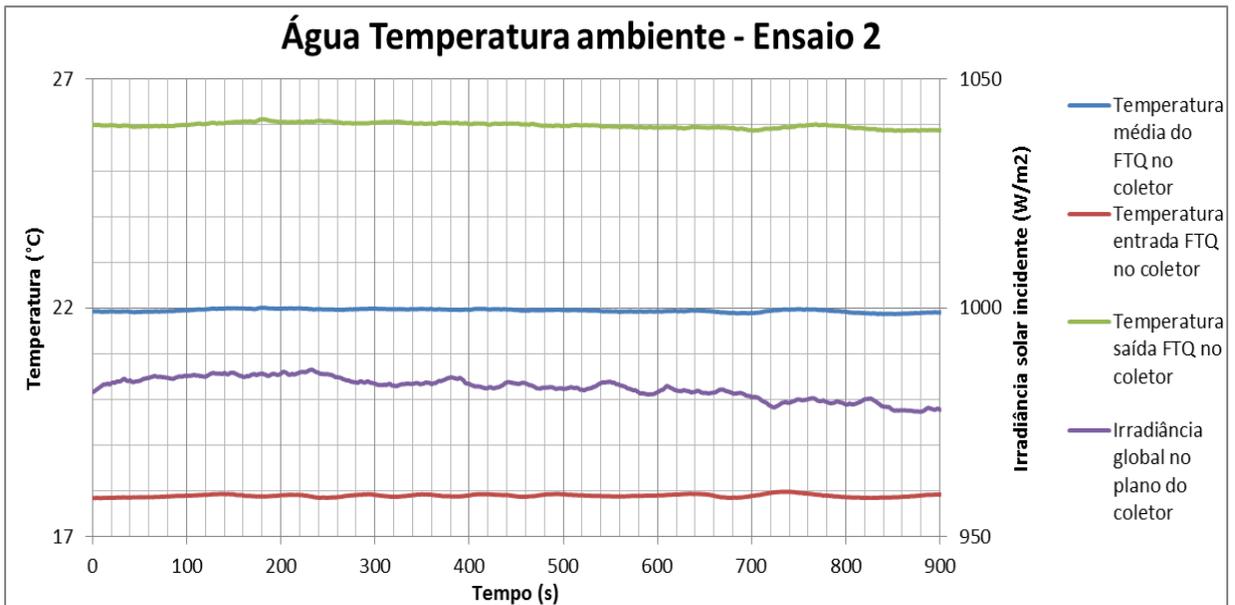


Figura 50 - Dados recolhidos do segundo ensaio a água à temperatura de entrada acima da temperatura ambiente

Quadro 17 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a água a uma temperatura de entrada acima da temperatura ambiente

	Irradiância (W/m ²)	Temp. ambiente (°C)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Temp. média (°C)	Eficiência coletor	
Ensaio1	993,41	16,87	17,89	26,04	21,97	0,80	Média
	2,26	0,08	0,04	0,06	0,05	0,02	Desvio
	0,23%	0,49%	0,21%	0,23%	0,21%	2,94%	% Erro
Ensaio2	982,63	16,71	17,90	25,99	21,95	0,81	Média
	2,35	0,18	0,03	0,06	0,03	0,02	Desvio
	0,24%	1,10%	0,16%	0,22%	0,15%	2,59%	% Erro

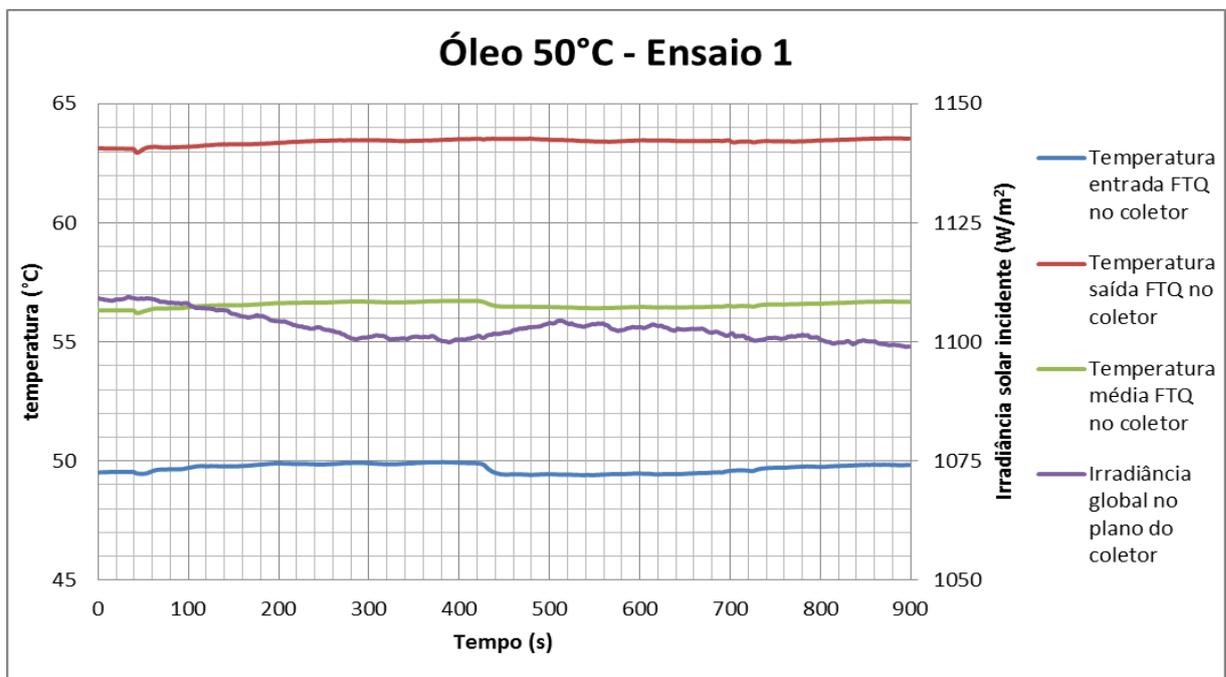


Figura 51 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a óleo à temperatura de entrada de 50°C

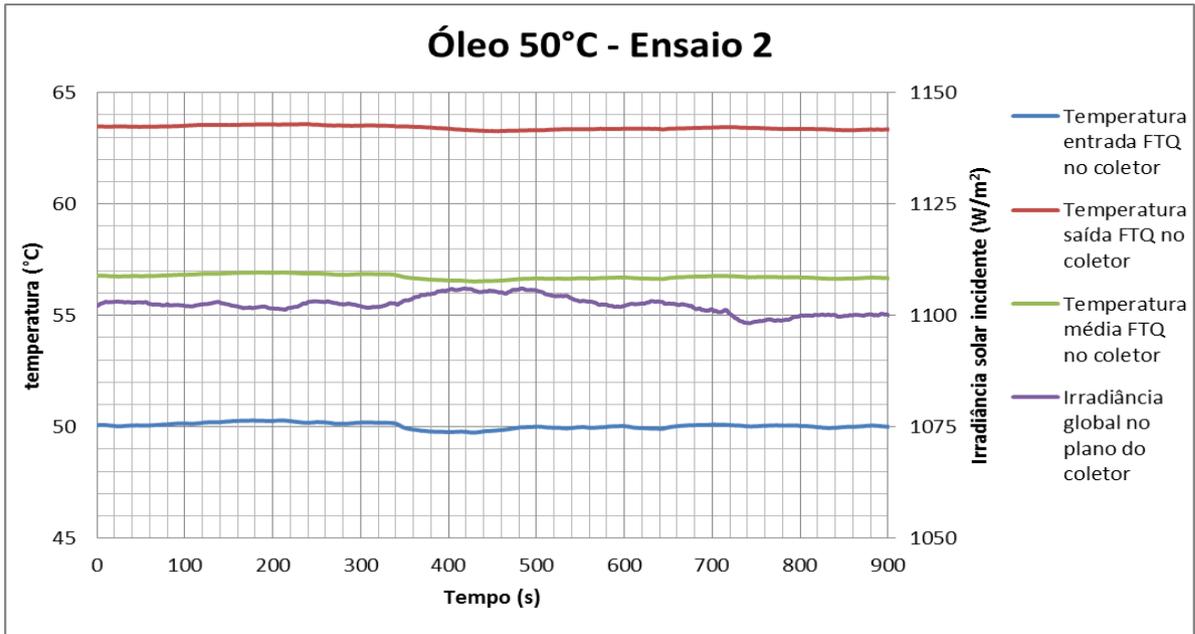


Figura 52 - Dados recolhidos do segundo ensaio a óleo à temperatura de entrada de 50°C

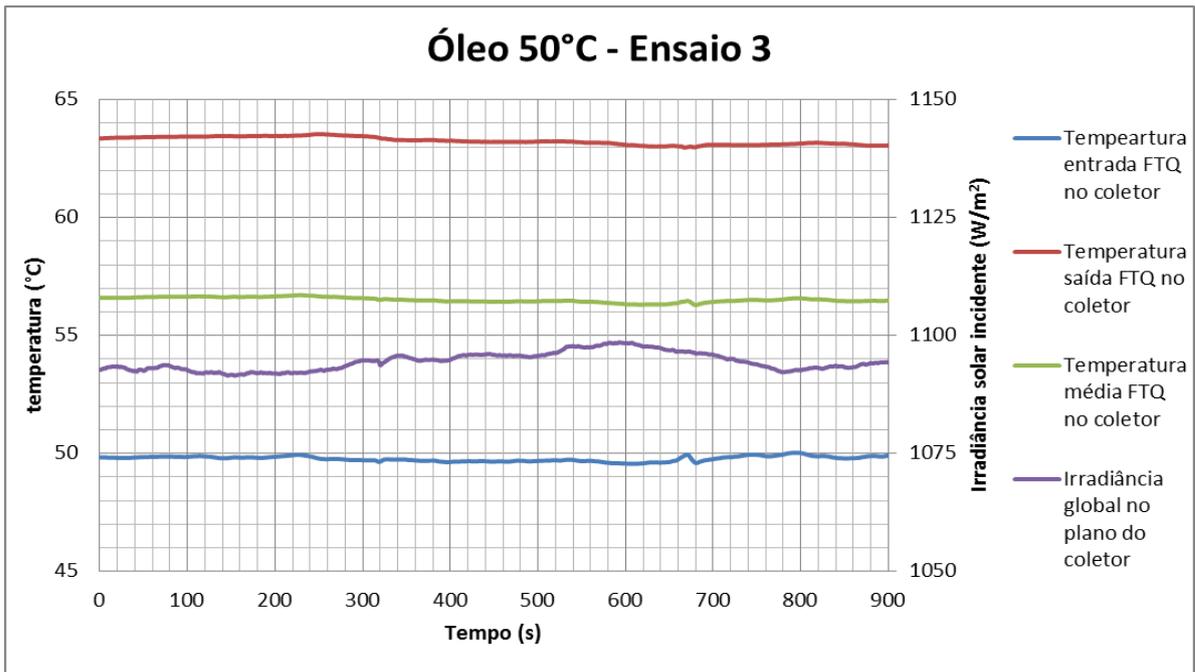


Figura 53 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a óleo à temperatura de entrada de 50°C

Quadro 18 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a óleo a uma temperatura de entrada de aproximadamente 50°C

	Irradiância (W/m ²)	Temp. ambiente (°C)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Temp. média (°C)	Eficiência coletor	
Ensaio1	1102,91	20,78	49,70	63,43	56,56	0,65	Média
	2,75	0,18	0,18	0,12	0,12	0,02	Desvio
	0,25%	0,86%	0,37%	0,19%	0,21%	2,32%	% Erro
Ensaio2	1102,20	20,81	50,05	63,42	56,73	0,64	Média
	2,02	0,11	0,13	0,09	0,10	0,01	Desvio
	0,18%	0,53%	0,26%	0,14%	0,18%	1,47%	% Erro
ensaio 3	1094,59	21,01	49,79	63,25	56,52	0,65	Média
	1,88	0,13	0,11	0,16	0,10	0,01	Desvio
	0,17%	0,63%	0,22%	0,25%	0,18%	2,18%	% Erro

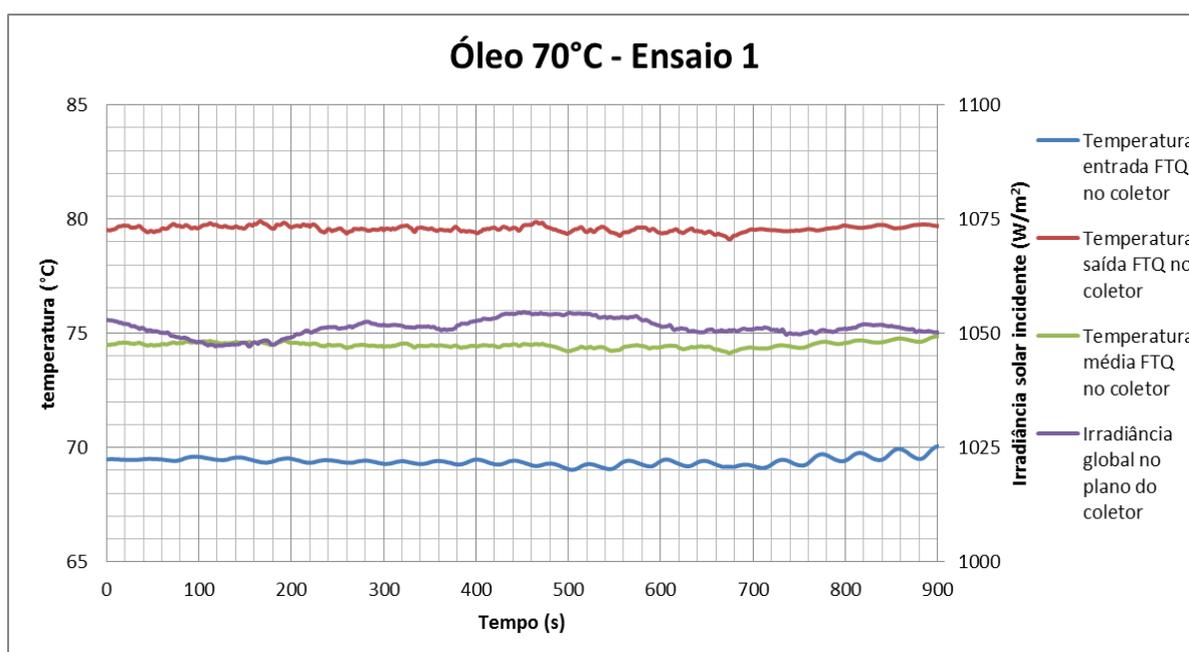


Figura 54 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a óleo à temperatura de entrada de 70°C

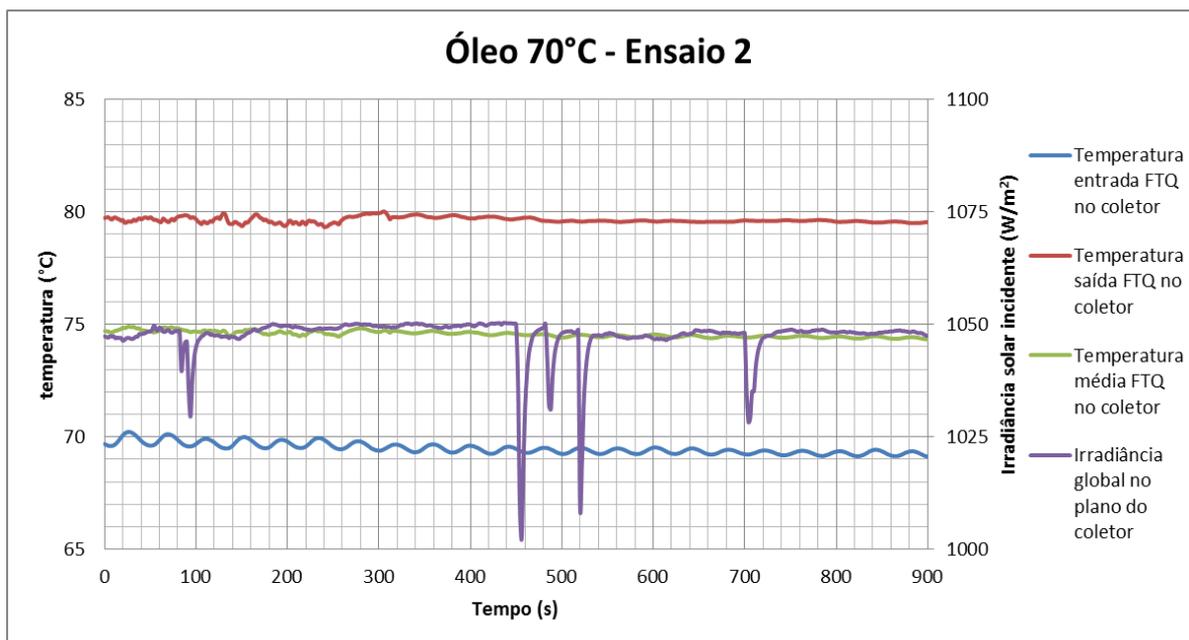


Figura 55 - Dados recolhidos do segundo ensaio a óleo à temperatura de entrada de 70°C

Quadro 19 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a óleo a uma temperatura de entrada de aproximadamente 70°C

	Irradiância (W/m ²)	Temp. ambiente (°C)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Temp. média (°C)	Eficiência coletor	
ensaio1	1051,19	21,92	69,42	79,59	74,51	0,55	Média
	1,79	0,07	0,19	0,13	0,14	0,01	Desvio
	0,17%	0,33%	0,28%	0,17%	0,19%	1,77%	% Erro
ensaio2	1047,45	22,27	69,49	79,64	74,57	0,58	Média
	4,87	0,06	0,23	0,12	0,13	0,02	Desvio
	0,46%	0,26%	0,34%	0,15%	0,18%	2,81%	% Erro

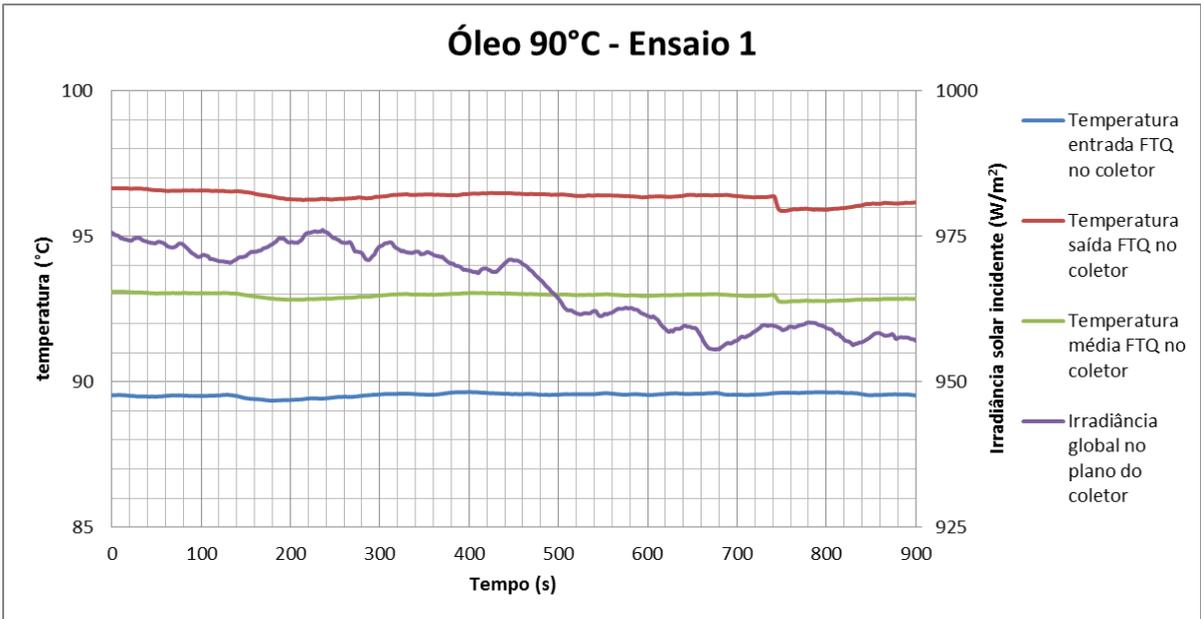


Figura 56 - Dados recolhidos do primeiro ensaio a óleo à temperatura de entrada de 90°C

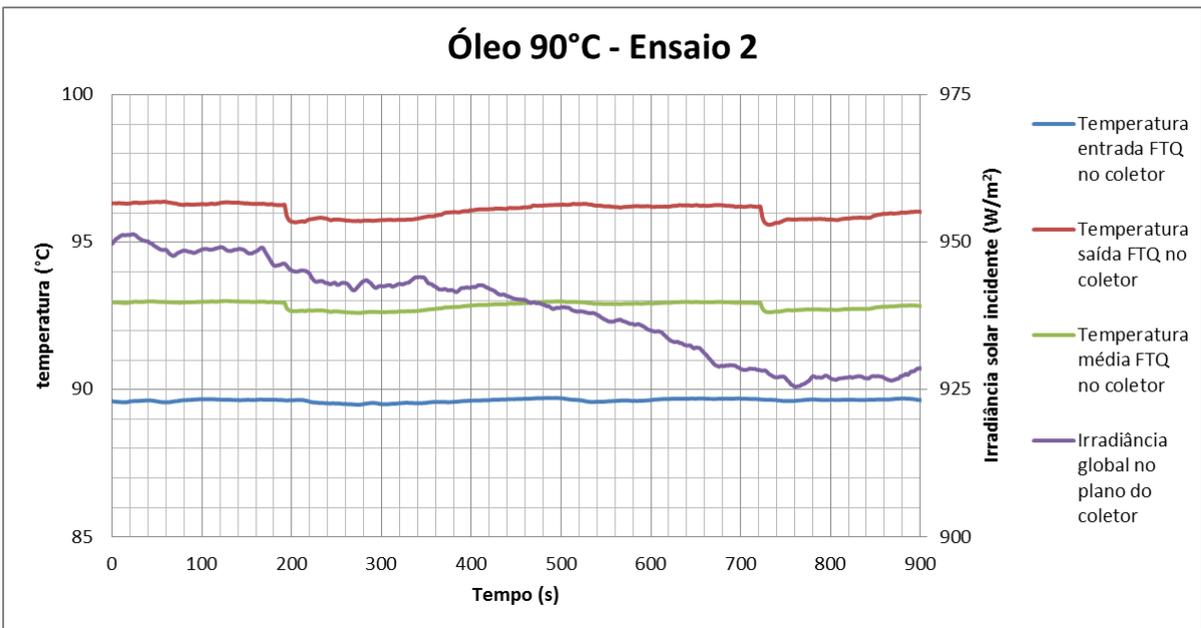


Figura 57 - Dados recolhidos do segundo ensaio a óleo à temperatura de entrada de 90°C

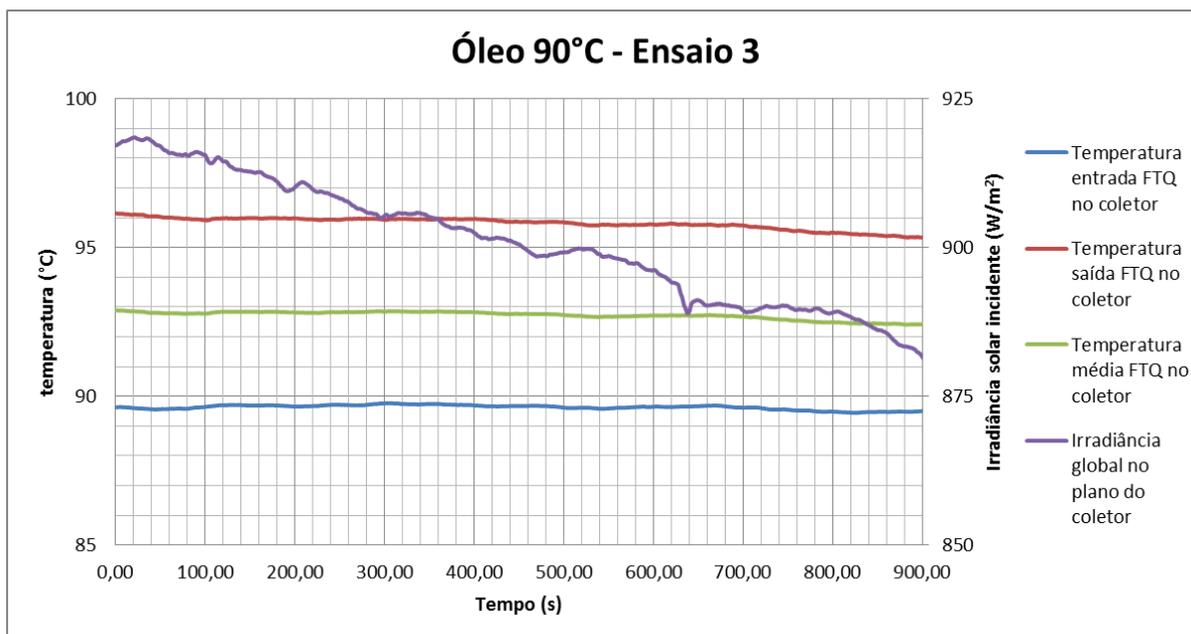


Figura 58 - Dados recolhidos do terceiro ensaio a óleo à temperatura de entrada de 90°C

Quadro 20 - Valores médios, desvios e percentagem de erro para os parâmetros mensurados e determinados do primeiro ensaio a óleo a uma temperatura de entrada de aproximadamente 90°C

	Irradiância (W/m ²)	Temp. ambiente (°C)	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Temp. média (°C)	Eficiência coletor	
Ensaio 1	966,30	22,20	89,55	96,36	92,95	0,44	Média
	6,77	0,09	0,07	0,18	0,09	0,01	Desvio
	0,70%	0,40%	0,07%	0,19%	0,10%	2,76%	% Erro
Ensaio 2	938,28	21,85	89,63	96,07	92,85	0,42	Média
	8,10	0,13	0,05	0,23	0,13	0,01	Desvio
	0,86%	0,61%	0,06%	0,24%	0,14%	3,08%	% Erro
Ensaio 3	900,68	22,01	89,63	95,81	92,72	0,42	Média
	10,29	0,12	0,08	0,20	0,14	0,01	Desvio
	1,14%	0,56%	0,09%	0,21%	0,15%	2,98%	% Erro

9.6. Anexo 6

Ângulos solares calculados para os períodos de ensaio.

Quadro 21 - Dias de ensaio e ângulos solares ao início e final de cada ensaio, por temperatura.

	Temp. de Ensaio	Dia	Declinação Solar (°)	Início Ensaio			Final Ensaio		
				Hora	Ângulo Horário (°)	Altura solar (°)	Hora	Ângulo Horário (°)	Altura Solar (°)
Água	T _{amb}	14-12-2013 (348)	-23,3	13,6	24,5	24,0	14,2	32,8	21,0
	30°C	14-11-2013 (318)	-18,9	11,7	-4,8	32,4	12,6	8,4	32,0
	50°C	14-11-2013 (318)	-18,9	14,0	30	26,0	14,9	43,2	19,8
	70°C	15-11-2013 (319)	-19,1	12,0	-0,5	32,3	12,8	11,8	31,3
	90°C	25-11-2013 (329)	-21,2	12,1	1,5	30,3	13,2	18,2	27,9
Óleo	50°C	08-03-2014 (67)	-5,6	12,3	4,3	45,7	13,2	17,6	42,9
	70°C	12-03-2014 (71)	-4,0	11,2	-12	46,0	11,9	-1,4	47,4
	90°C	12-03-2014 (71)	-4,0	15,4	50,5	26,9	16,1	62,0	18,9

9.7. Anexo 7

Quadro 22 - Velocidade mínima, máxima e média do vento ao longo dos ensaios para cada faixa de temperatura.

		Velocidade do vento (m/s)		
		Mínimo	Máximo	Média
Água	T _{amb}	1,1	2,5	1,8
	30	-	-	-
	50	-	-	-
	70	-	-	-
	90	-	-	-
Óleo	50	1	3,1	2,1
	70	0,3	1,3	0,8
	90	0,3	0,8	0,5