

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ALISSON GUSTAVO KALIL

**COMISSIONAMENTO E TESTE DE UM COLETOR TÉRMICO SOLAR
INTEGRADO AO TELHADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

ALISSON GUSTAVO KALIL

COMISSIONAMENTO E TESTE DE UM COLETOR TÉRMICO SOLAR INTEGRADO AO TELHADO

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. David Kennedy, Dr. Eng.

Co-orientador: Prof. Rubens Alexandre de Faria,
Dr. Eng.

CURITIBA

2016

RESUMO

A demanda por mais energia trouxe muita tecnologia aos laboratórios. Agora, é necessário estudá-las e fazer delas baratas, produtivas e eficientes. Dentro desse quadro a energia solar é muito promissora, tendo resultados muito satisfatórios em baixas latitudes, porém continua sendo um desafio em países de maior latitude.

Muito comum na Europa, o Sistema de aquecimento de água é parte da vida das pessoas e tem um custo considerável em suas despesas. Coletor Térmico Solar é a tecnologia desenvolvida para aquecer a água doméstica. Estudar essa tecnologia é um dos modos de fazê-la viável em países como a Irlanda.

Este trabalho analisa a estrutura montada no laboratório de energia do DIT: um coletor solar integrado a um telhado. O objetivo foi validar a estrutura e o sistema de aquecimento de água, simulando no laboratório a irradiação solar do ambiente externo.

O Sistema funcionou com algumas limitações, mas foi capaz de simular dias comuns a cada mês na Irlanda. Alguns problemas foram encontrados e devem ser corrigidos para aumentar a eficiência. O coletor solar foi muito eficiente na conversão de energia. O isolamento térmico colocado no interior do teto cumpriu sua função, validando o design do coletor integrado ao teto.

Palavras-chave: Energia Solar, Coletor Solar, Aquecimento de água.

ABSTRACT

The demand for new energy brought several new technologies for laboratories. Now it is necessary to study them and make them cheap, productive and efficient. Solar energy is very promising, as have many good results in low latitude countries, but still a challenge for countries of cold and cloudy weather.

Very common in Europe, the water heating system is part of people's lives and this is a considerable cost on your expenses. Solar thermal collectors are the technology developed for heating domestic water. Study this technology is one of the ways to make it viable in a country like Ireland.

This paper analyzes the structure mounted on the DIT energy laboratory, a roof integrated solar collector. The goal was to validate the structure and the water heating system, simulating irradiation of the external environment in the laboratory.

The system worked in a way, and was able to simulate common days every month in Ireland. Some problems were found in the system and must be corrected to an improvement in efficiency. The solar collector was very efficient in energy conversion. The thermal insulation carried on the inside of the roof work, allowing the design of the collector integrated in a roof.

Keywords: solar energy, solar collector, hot water system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Vista frontal do coletor térmico solar integrado ao telhado.....	11
Figura 2 Vista posterior do coletor térmico solar integrado ao telhado.....	11
Figura 3 Ilustração da lei do inverso do quadrado.....	14
Figura 4 Altura do sol	15
Figura 5 Média anual de luz do dia na Irlanda no período entre 1981 e 2010	17
Figura 6 Média sazonal de luz do dia na Irlanda no período entre 1981 e 2010	18
Figura 7 Diferenças sazonais da altura do sol.....	20
Figura 8 Ângulos referentes à orientação do coletor solar	21
Figura 9 Irradiação horizontal global	22
Figura 10 Irradiação horizontal europeia.....	23
Figura 11 Irradiação horizontal irlandesa	23
Figura 12 Diagrama do sistema construído por Finn.....	25
Figura 13 Holofotes	26
Figura 14 Perfil metálico 25x25	27
Figura 15 Perfil metálico 50x25	27
Figura 16 Perfil de alumínio 40x40.....	28
Figura 17 Perfil metálico 50x50	28
Figura 18 Junta articulada para ajustar o ângulo	29
Figura 19 Junta articulada para ajustar a altura	30
Figura 20 Fonte de calor	30
Figura 21 Fonte de calor	31
Figura 22 Layout dos holofotes	32
Figura 23 Interruptores da fonte de calor	33
Figura 24 RCBO dentro da caixa de interruptores	33

Figura 25 Holofotes conectados em série	34
Figura 26 Detalhe da conexão dos holofotes	34
Figura 27 Piranômetro instalado na estrutura	36
Figura 28 Multímetro ajustado para mV DC	36
Figura 29 Ilustração das posições de teste do piranômetro	37
Figura 30 Piranômetro durante o teste	37
Figura 31 Piranômetro durante o teste	38
Figura 32 Piranômetro durante o teste na posição 2.....	38
Figura 33 Gráfico da radiação nas diferentes distâncias de teste	40
Figura 34 Temperatura no tanque versus tempo de operação	42
Figura 35 Estação de enchimento.....	44
Figura 36 Mangueira de pressão conectada à saída da bomba.....	45
Figura 37 Mangueira de retorno posicionada no reservatório	45
Figura 38 Saída do reservatório conectada à entrada da bomba.....	46
Figura 39 Válvulas da estação de bombeamento fechadas	47
Figura 40 Mangueira de pressão na porta superior e mangueira de retorno na porta inferior	47
Figura 41 Válvula sob o reservatório	48
Figura 42 Posicionamento das válvulas para a pressurização do sistema	48
Figura 43 Ligação elétrica no controlador	49
Figura 44 Conexão dos sensores no controlador.....	49
Figura 45 Display de seleção de linguagem.....	50
Figura 46 Display de configuração de hora e data	50
Figura 47 Display de seleção do grupo	51
Figura 48 Display de seleção do sistema	51
Figura 49 Display de seleção das bombas em operação	52

Figura 50 Irradiação que atinge o coletor	54
Figura 51 Imagem térmica FLIR dos holofotes.....	56
Figura 52 Imagem térmica FLIR do coletor	56
Figura 53 Imagem térmica FLIR do coletor	57
Figura 54 Imagem térmica FLIR da saída do coletor	57
Figura 55 Imagem térmica posterior da estrutura.....	58
Figura 56 Imagem térmica da estação de bombeamento	58
Figura 57 Gráfico do teste a 30 cm (1,5 kW/m ²).....	60
Figura 58 Gráfico do teste a 50 cm (0,95 kW/m ²).....	61
Figura 59 Gráfico do teste a 70cm (0,57 kW/m ²).....	62
Figura 60 Gráfico do decréscimo de temperatura no tanque depois de desligar a fonte de calor	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Horas de luz do dia em Dublin	19
Tabela 2 Luz do dia total em Dublin por estação	19
Tabela 3 Comparação da quantidade de luz do dia entre a Irlanda e outros países europeus	19
Tabela 4 Radiação solar no Aeroporto de Dublin 2013 - 2016.....	22
Tabela 5 Radiação solar média (kW/m ²) no aeroporto de Dublin 2013-2016.....	22
Tabela 6 Especificação do coletor térmico solar	24
Tabela 7 Medidas do teste de radiação	39
Tabela 8 Taxa em que a distância influencia a distribuição da radiação.....	40
Tabela 9 Horas de operação necessárias para que a fonte de calor simule o clima irlandês (primeiro semestre).....	41
Tabela 10 Horas de operação necessárias para que a fonte de calor simule o clima irlandês (primeiro semestre).....	41
Tabela 11 Aumento da temperatura da água em um dia a cada mês do ano	42
Tabela 12 Eficiência do coletor	63
Tabela 13 Eficiência do sistema.....	64
Tabela 14 Perda de temperatura no tubo plástico.....	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	10
1.1.1	A viabilidade	12
1.1.2	Os testes	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Relações entre Sol e Terra	13
2.2	Radiação Solar	13
2.3	Altura do sol	15
2.4	Horas de luz solar	15
2.5	Posição do coletor solar	20
2.6	Radiação solar na Irlanda	21
3	MATERIAL E METODOLOGIA	24
3.1	Coletor Térmico Solar	24
3.2	Estrutura luminosa	25
3.2.1	Fonte de calor	26
3.2.2	Estrutura Metálica	27
3.2.3	Instalação das lâmpadas	31
3.3	Testando a radiação	35
3.3.1	Distância entre o coletor solar e a fonte de calor	35
3.3.2	Cruzando dados com a radiação real na Irlanda	40
3.4	COMISSIONAMENTO	43
3.4.1	Estação de enchimento	43
3.4.2	Controlador de temperaturas	49
3.4.3	Ligando o aquecimento	52
4	CÁLCULOS	53
4.1	Energia para aquecer a água	53
4.2	Eficiência do coletor	54
4.3	Eficiência do sistema	55
4.4	Eficiência global	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1	Aumento da temperatura da água	60
1.1.	Energia para aquecer a água	62
5.2	Eficiência do coletor	63
5.3	Eficiência do sistema	63
5.4	Eficiência global	64
5.5	Perdas de temperatura	64
5.6	Tanque de armazenamento	66
6	CONCLUSÕES	67
6.1	Conclusões	67
6.2	Recomendações	68

7 REFERÊNCIAS	70
7.1 Livros, sites e jornais	70
7.2 Referências de gravuras.....	72

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

Comissionar significa botar em prática o conjunto de técnicas necessárias para que o equipamento instalado opere de acordo com o projeto quando este estiver em fase de operação.

Esta prática permite antever possíveis falhas, melhorias na estrutura e na manutenção do equipamento. Almeida (ALMEIDA, 2012) definiu comissionamento de uma célula fotovoltaica como “A qualificação de um Sistema fotovoltaico conectado à rede pode ser entendido como uma série de atividades em ordem de julgar se o sistema está instalado corretamente e apto para operar em segurança, e se tem uma performance satisfatória em termos de produção de energia”. O sistema usado neste projeto não é fotovoltaico, porém a definição se aplica a este estudo também. Baseado nisso, esta pesquisa objetiva analisar o Sistema integrado desenvolvido por Finn (FINN, 2015) no Instituto de Tecnologia de Dublin (DIT).

O sistema, mostrado nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! nte de referência não encontrada.**, consiste em um coletor térmico solar de tubos a vácuo integrado a uma estrutura similar a um telhado.



Figura 1 Vista frontal do coletor térmico solar integrado ao telhado



Figura 2 Vista posterior do coletor térmico solar integrado ao telhado

1.1.1 A viabilidade

O clima da Irlanda o inverno não é favorável a geração de energia solar devido ao constante céu nublado e períodos curtos de luz durante o dia. Por isso, para permitir o teste do equipamento foi necessária a construção de uma estrutura para simular o calor emitido pelo sol.

1.1.2 Os testes

Para checar a operação do Sistema, alguns testes foram realizados. A eficiência do coletor solar, a eficiência do Sistema de aquecimento de água, o aumento de temperatura e a capacidade do tanque de armazenamento de manter a temperatura da água.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Relações entre Sol e Terra

A mudança de temperatura que ocorre durante o ano em diferentes regiões da Terra é explicada pelas interações entre o Sol e a Terra e a posição relativa entre eles.

A Terra realiza dois movimentos: rotação e translação. A translação se refere ao movimento da Terra em sua órbita elíptica em torno do sol e tem duração de um ano. A rotação em torno do próprio eixo é responsável pelo ciclo dia-noite e, obviamente, dura vinte e quatro horas. Nenhum desses movimentos seria de grande interesse para esse trabalho se não fosse outro fator presente nessa relação: a inclinação da Terra referente ao seu eixo de rotação.

Esta inclinação é responsável pelas estações do ano. Ela causa uma continua mudança na orientação relativa entre Terra e Sol enquanto o movimento de translação ocorre. O hemisfério sul é inclinado para o lado mais distante do sol durante o inverno brasileiro, e é inclinado para o lado mais próximo do Sol durante o verão. Isso significa que a altura do sol, o ângulo de elevação relativa entre o sol e o horizonte para um dado instante do dia, varia com o passar dos meses. No hemisfério de verão, as Alturas do sol registradas são maiores e os dias são mais extensos. No inverno, as Alturas do sol registradas são menores, os dias mais curtos e um somatório de radiação recebida menor (GRIMM).

2.2 Radiação Solar

Energia solar é criada no núcleo do sol, onde fissões nucleares transformam hidrogênio em hélio. Setecentos milhões (700 milhões) de toneladas de hidrogênio são convertidos em hélio a cada segundo. Esse processo gera muito calor e resulta numa descarga de fótons. Cada fóton emitido viaja apenas uma pequena fração de espaço até ser consumido novamente por um átomo vizinho, causando o aquecimento

deste e conseqüentemente a re-emissão do fóton. Esse processo acontece várias vezes, até que a radiação seja realmente lançada ao espaço (PIDWIRNY).

A maior parte da radiação eletromagnética emitida pelo sol é visível para o olho humano, mas uma quantidade considerável de energia opera nas regiões ultravioleta e infravermelho. Ao todo, cerca de sessenta e três milhões de Watts por metro quadrado ($63,000,000 \text{ W / m}^2$) são emitidos da superfície só sol. Esta energia viaja através do espaço e é absorvida por toda a matéria encontrada em seu caminho (planetas, gases, poeira).

Para calcular a intensidade da energia solar que atinge esses objetos é usada a Lei do Inverso do Quadrado. Esta lei enuncia que a intensidade da radiação emitida pelo sol varia com o quadrado da distância entre fonte e objeto.

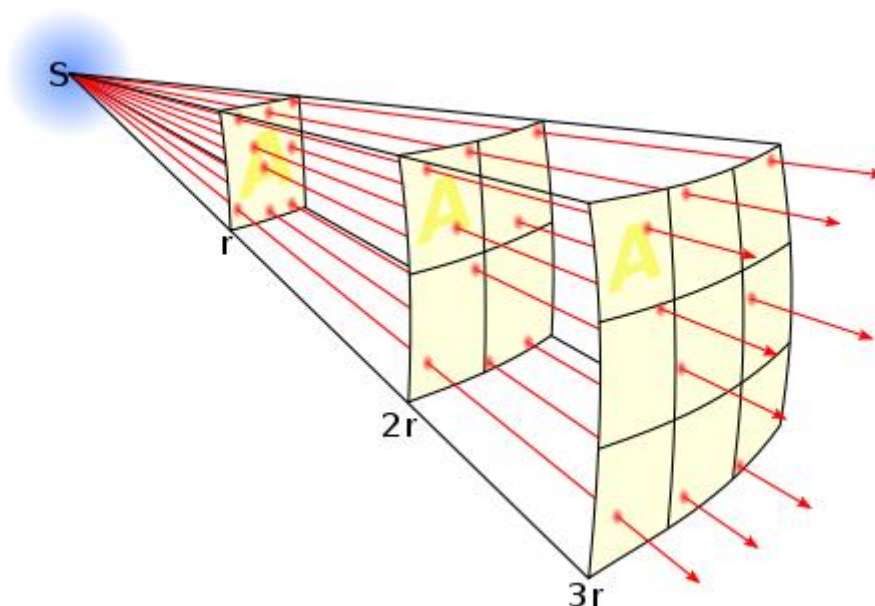


Figura 3 Ilustração da lei do inverso do quadrado

Sendo cento e quarenta e nove milhões e quinhentos mil quilômetros ($149,500,000 \text{ km}$) a distância média entre Sol e Terra, a quantidade de radiação que atinge a atmosfera terrestre é aproximadamente mil trezentos e sessenta e sete Watts por metro quadrado ($1,367 \text{ W / m}^2$) (ZIRIN).

Para este estudo, a quantidade de radiação recebida vai depender de outros fatores dessa relação entre os dois astros, como a duração do dia e a altura do sol.

2.3 Altura do sol

Devido ao formato não linear da Terra, a altura do sol varia com a latitude. A altura do sol é medida em graus, medido entre a direção que o sol está e o horizonte. Quanto menor a altura do sol, menor é a intensidade da radiação, porque o caminho dos raios pela atmosfera aumenta, aumentando a interação, espalhamento e absorção da radiação antes de atingir a superfície da Terra.

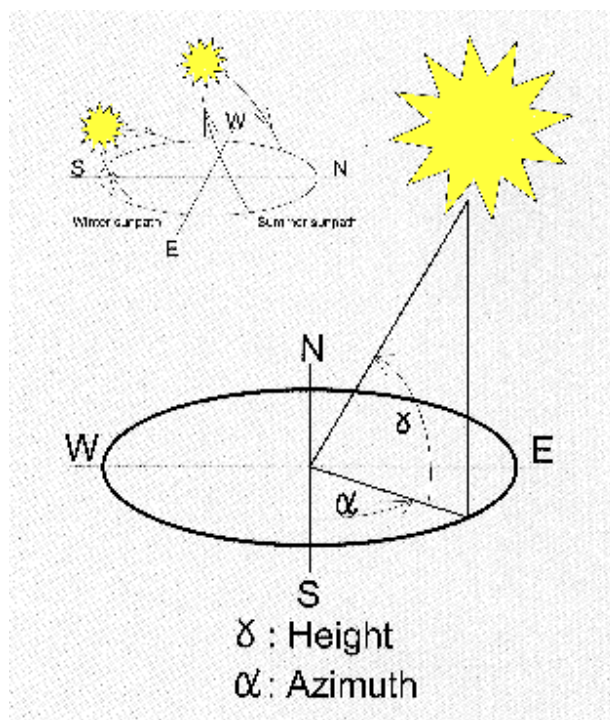


Figura 4 Altura do sol

2.4 Horas de luz solar

Dependendo de onde estamos na Terra, nós observamos o Sol com diferentes trajetórias relativas com o horizonte. Se nós estivermos, por exemplo, em um polo

geográfico (latitude 90), o céu vai parecer rodar em torno de um eixo que passa exatamente por nós, perpendicularmente ao solo. O sol e outras estrelas irão descrever trajetórias circulares, paralelas ao horizonte, sendo visíveis 24 horas por dia.

Desta maneira, nos polos da Terra não há nascer ou pôr do sol. Isto ocorre porque nessas regiões (e também nas proximidades) existe um fenômeno chamado Sol da Meia Noite, quando mesmo a noite o sol está acima do horizonte. Para observadores que estão na latitude 0° (linha do equador), o sol e outras estrelas vão descrever um movimento perpendicular com o horizonte. Porém, se estivermos numa latitude intermediária, as estrelas seguirão uma trajetória inclinada relativa ao horizonte e a duração do dia será afetada pela época do ano. Como a Irlanda está localizada numa latitude elevada, os dias inverniais tendem a ser curtos, e no verão, tendem a ser bem mais longos (FINN, 2015).

De qualquer maneira, não é só a duração do dia que afeta a quantidade de luz diária. De acordo com a World Meteorological Organization, a duração da luz solar durante um dado período é definida como a soma dos subperíodos para qual a radiação solar direta exceda 120 W/m^2 (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2008).

As **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência o encontrada.** mostram a média anual de luz do dia em horas no território irlandês desde 1981 até 2010, e a quantidade de luz do dia em horas em cada estação do ano no mesmo país e período.

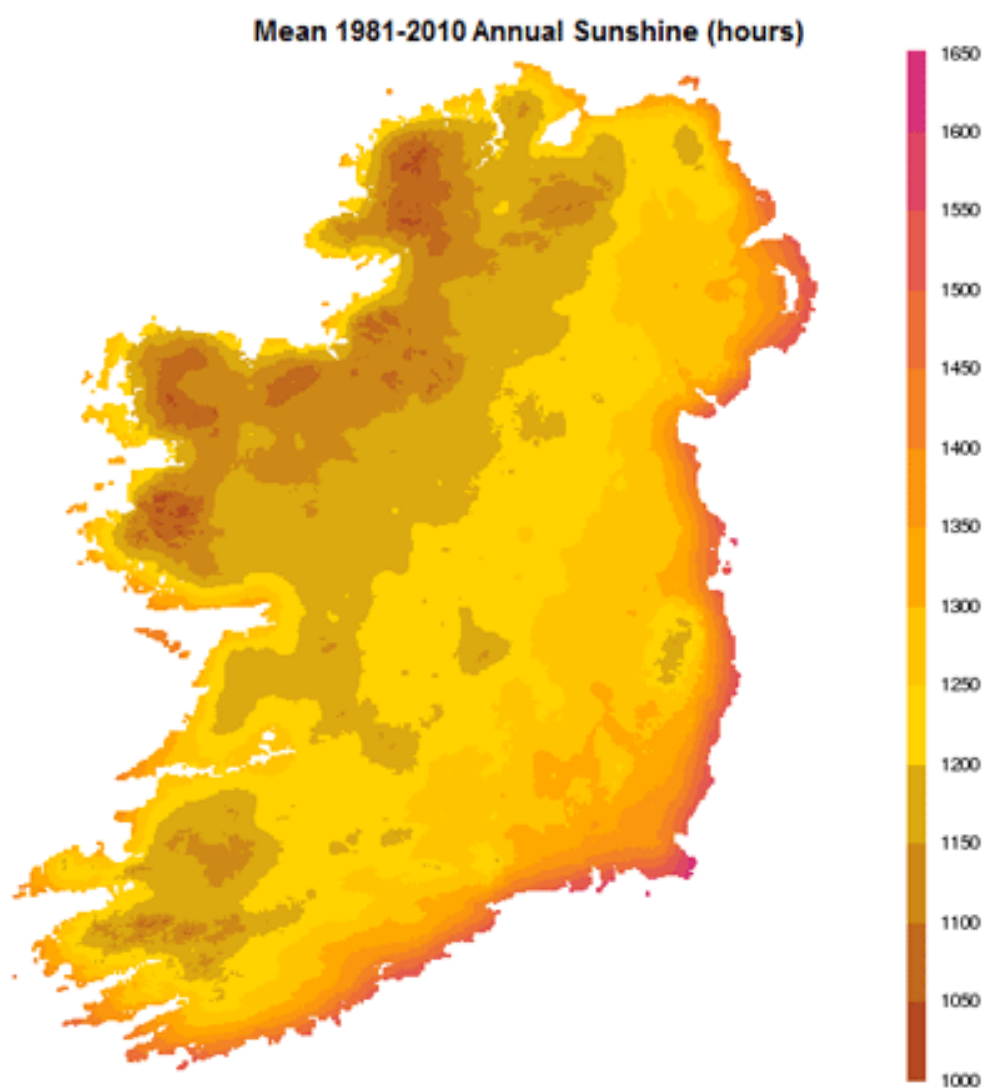


Figura 5 Média anual de luz do dia na Irlanda no período entre 1981 e 2010

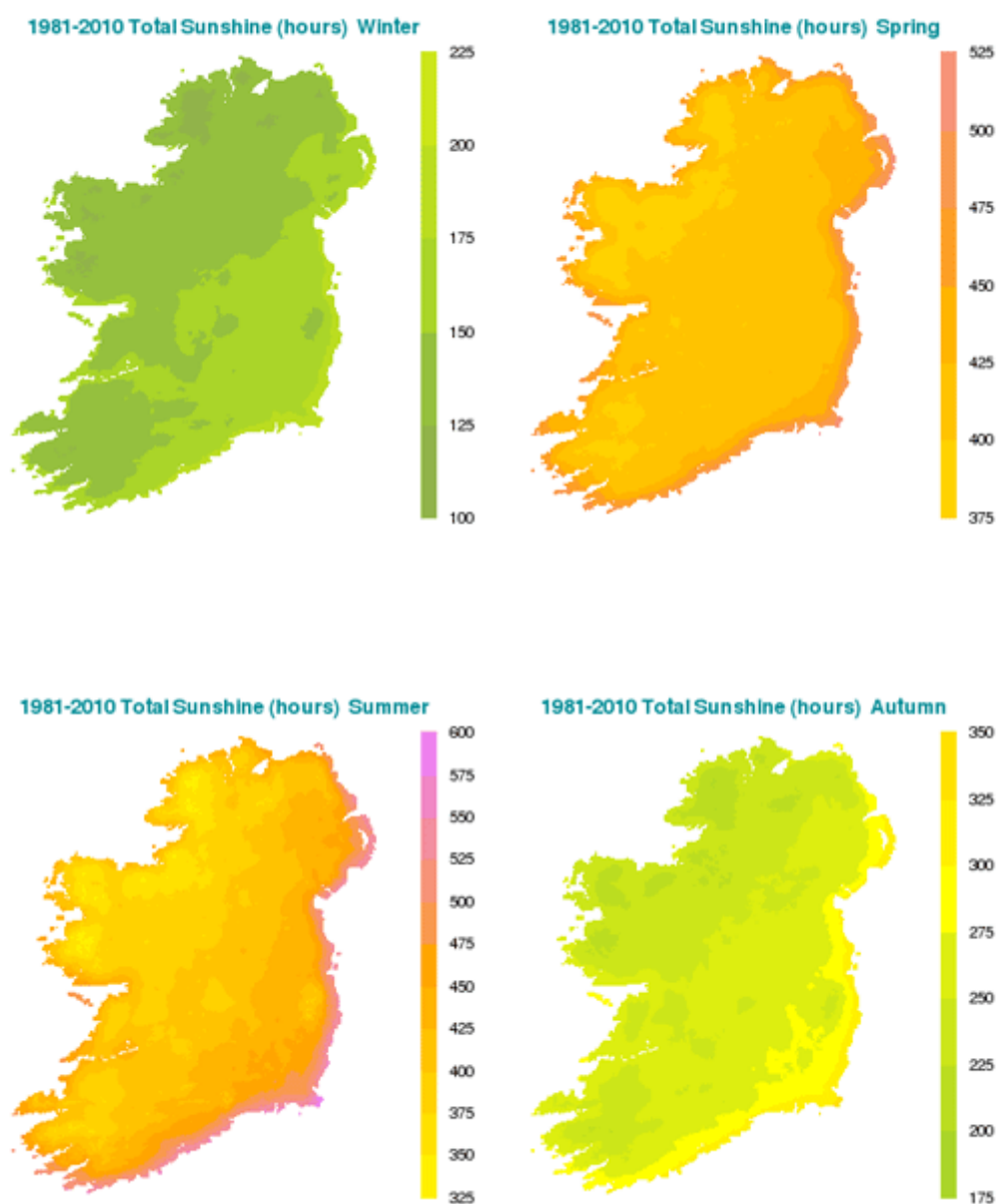


Figura 6 Média sazonal de luz do dia na Irlanda no período entre 1981 e 2010

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os dados da quantidade média de luz do dia em Dublin, de acordo com Weather Online Ltd (WEATHER ONLINE).

Tabela 1 Horas de luz do dia em Dublin

Luz do dia em Dublin (horas)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Mensal	62	84	93	150	186	180	155	155	120	93	60	62
Média diária	2	3	3	5	6	6	5	5	4	3	2	2

Tabela 2 Luz do dia total em Dublin por estação

Luz do dia em Dublin (horas)				
Inverno	Primavera	Verão	Outono	Anual
208	429	490	273	1400

Comparando com outros países europeus, a Irlanda tem um pequeno período de luz do dia, e conseqüentemente uma pequena taxa de radiação solar (POULTER).

Tabela 3 Comparação da quantidade de luz do dia entre a Irlanda e outros países europeus

	Horas anuais de luz do dia	Quantidade de luz do dia que excede a quantia irlandesa anual
Espanha	2665	91%
Itália	2356	69%
França	1967	41%
Dinamarca	1706	22%
Suécia	1702	22%
Alemanha	1573	13%
Polônia	1514	8%
UK	1476	6%
Holanda	1414	1%
Irlanda	1397	-
Média	1777	27%

2.5 Posição do coletor solar

A posição do sol em relação a um plano situado em qualquer orientação relativa a Terra pode ser descrita em termos de diversos ângulos (DUFFIE et al, 2016).

O coletor deve ser virado para o equador, que é a direção do sol do meio dia. Para locais no hemisfério norte, o coletor deve ser virado para o sul. Para locais no hemisfério sul, o coletor deve ser virado para o norte. Qualquer direção diferente representará perdas de energia no somatório anual.

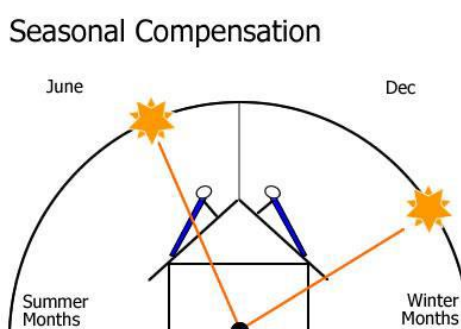


Figura 7 Diferenças sazonais da altura do sol

Como mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a posição do sol muda ao longo do ano, sendo mais baixo no inverno. O ângulo para maximizar a exposição do coletor fica entre 15 e 20 graus maior que o ângulo de latitude do local. Em Dublin o ângulo de latitude é $53^{\circ}19'48''$ (GAISMA), logo um ângulo de instalação aceitável está entre 68 e 73 graus.

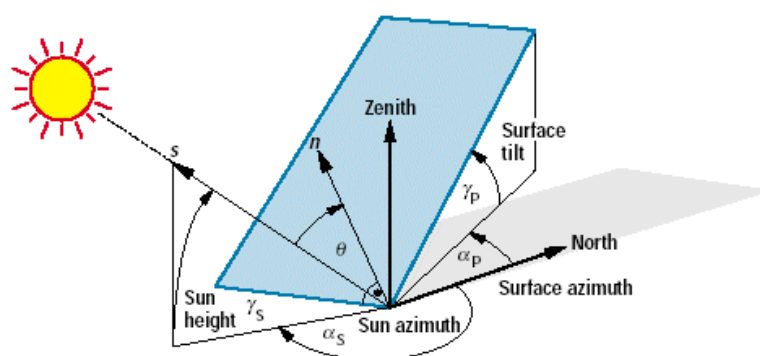


Figura 8 Ângulos referentes à orientação do coletor solar

Onde:

γ_s = a altura do sol, medida da linha que parte do Sistema térmico solar até o centro do sol.

α = o ângulo azimute, medido como a distância angular entre o sul verdadeiro e o ponto no horizonte diretamente abaixo do sol.

α_s = o ângulo zênite solar, medido entre o ponto diretamente abaixo do sol e o norte geográfico.

β = o ângulo de inclinação ou de incidência, medido como a inclinação do coletor solar.

2.6 Radiação solar na Irlanda

As medições de irradiação solar do serviço de meteorologia irlandês (Met Éireann) no aeroporto de Dublin desde 1981 até 2010 são mostradas na **Erro! Fonte e referência não encontrada.** (MET EIREANN, 2015). A conversão para quilowatt por metro quadrado é mostrada na **Erro! Fonte e referência não encontrada.** A **REF_Ref449031384 \h * MERGEFORMAT Erro! Fonte e referência não encontrada., Erro! Fonte e referência não encontrada. e Erro! Fonte e referência não encontrada.** mostra mapas de radiação solar no mundo, na Europa e na Irlanda, respectivamente, para comparação.

Tabela 4 Radiação solar no Aeroporto de Dublin 2013 - 2016

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2016	7,4	13,1	27,3									
2015	8,7	13,2	29,5	47,5	51,4	60,2	48,3	44,5	32,3	17,3	7,5	4,7
2014	6,5	14,7	25,4	42,9	45,3	57,1	54,0	42,4	32,0	19,4	8,1	6,3
2013	5,9	12,1	20,0	40,3	55,7	59,7	61,9	43,3	31,7	16,0	10,2	6,1
Média	7,2	12,8	25,7	42,9	52,5	52,6	50,9	42,5	30,0	18,2	8,9	5,6

Tabela 5 Radiação solar média (kW/m²) no aeroporto de Dublin 2013-2016

Radiação solar (kWh/m ²) no aeroporto de Dublin (média 2013 – 2016)												
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dev
Mensal (kWh/m ²)	20,1	35,5	71,4	109,5	145,9	146,3	141,3	118,1	83,5	50,5	24,8	15,4
Diária (kWh/m ²)	0,6	1,3	2,3	3,6	4,7	4,9	4,6	3,8	2,8	1,6	0,8	0,5

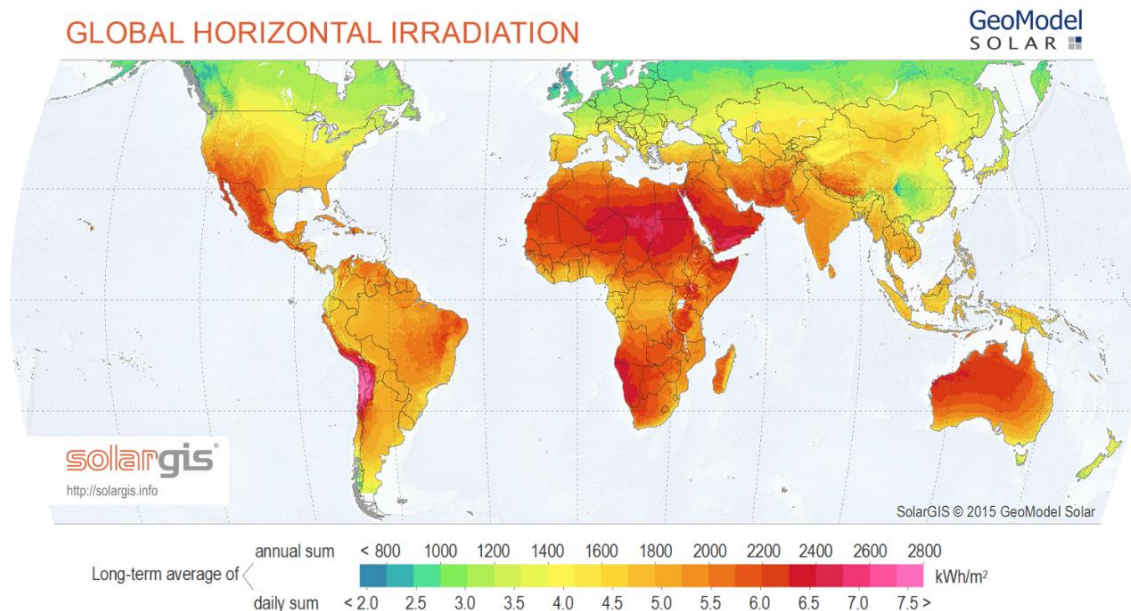


Figura 9 Irradiação horizontal global

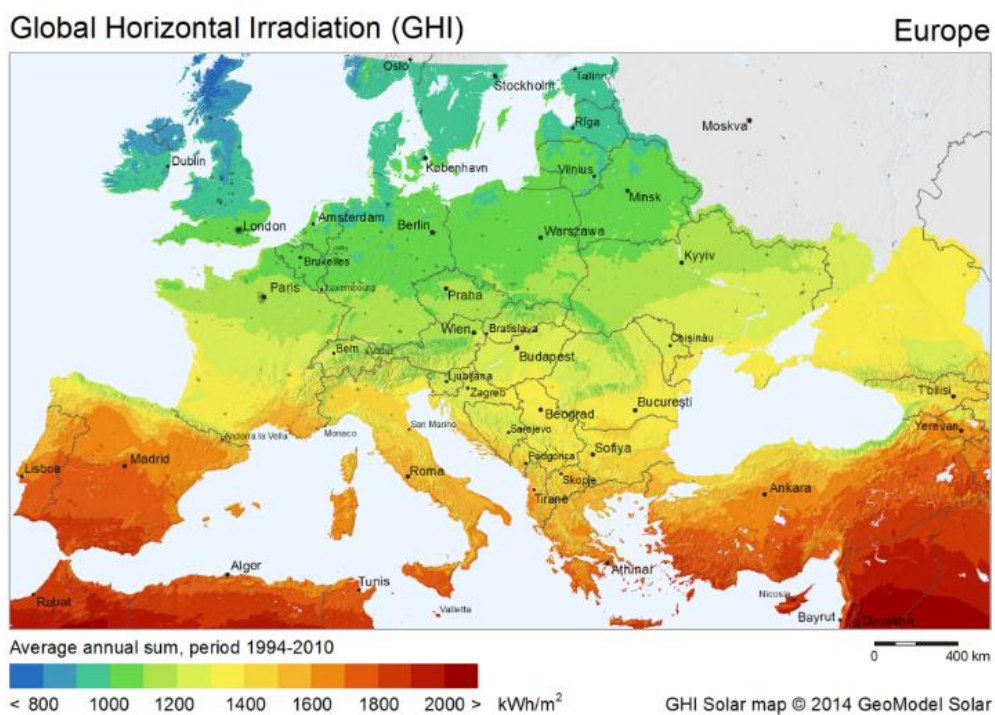


Figura 10 Irradiação horizontal europeia

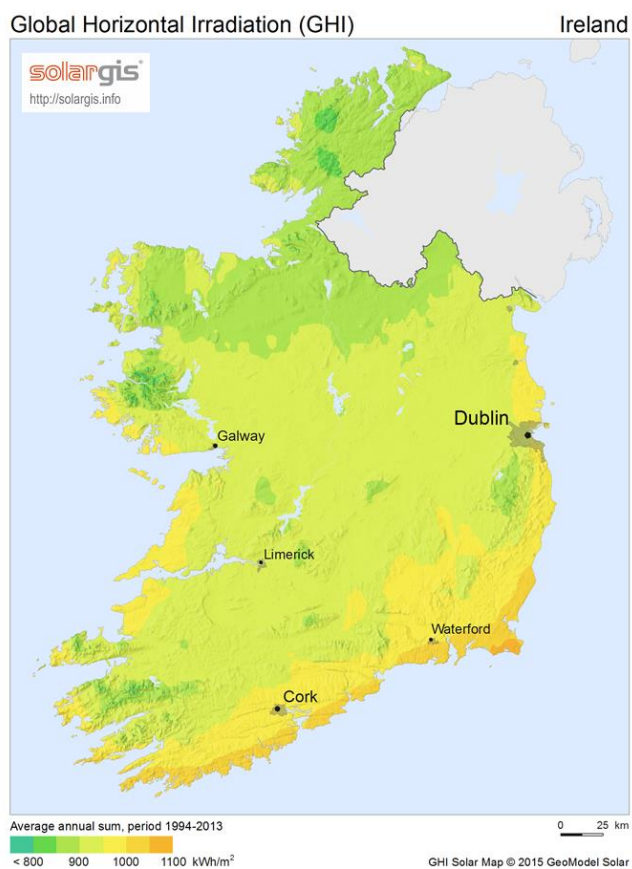


Figura 11 Irradiação horizontal irlandesa

3 MATERIAL E METODOLOGIA

3.1 Coletor Térmico Solar

Finn (FINN, 2015) desenvolveu uma estrutura com um Sistema de Tubos a Vácuo Thermomax HP 200. Este Sistema provê dez tubos coletores de calor a seco de fácil instalação e manutenção. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ostra as características do sistema Themomax HP 200 (KINGSPAM SOLAR).

Tabela 6 Especificação do coletor térmico solar

	HP200 / HP250		
	1m ²	2m ²	3m ²
Number of Tubes	10	20	30
Dimensions			
Absorber Area (m ²)	1.007	2.01	3.021
Overall Dimensions (mm)	2005 x 709 x 97	2005 x 1418 x 97	2005 x 2127 x 97
Width of Manifold (mm)	709	1418	2127
Length (tube and manifold) (mm)	2005	2005	2005
Depth (mm)	97	97	97
Aperture Area (m ²)	1.07	2.16	3.23
Fluid Volume (ltr)	0.6	1.1	1.7
Inlet and Outlet Dimensions (mm)	22	22	22
Weight (empty) (kg)	25	50.3	75.1
Mounting			
Recommended Inclination (°)	20-70	20-70	20-70
Performance Data			
Efficiency	Based on Aperture	Based on Aperture	Based on Aperture
Eta 0	0.726	0.738	0.727
a1 (W/m ² K)	1.55	1.17	0.85
a2 (W/m ² K ²)	0.0058	0.0082	0.0093
Solar Keymark Licence Numbers	HP200: 011-7S125R		HP250: 011-7S904R
Operating Data			
Flow Rate (ltr/h)			
Rated	80	160	240
Minimum	60	120	180
Maximum	150	300	480
Maximum Operating Pressure	8 Bar	8 Bar	8 Bar
Stagnation Temperature (°C)	184 / 217	184 / 217	184 / 217
Heat Transfer Fluid	Water / Glycol	Water/Glycol	Water / Glycol
Materials			
Absorber	Copper	Copper	Copper
Coating	Selective Coating	Selective Coating	Selective Coating
Absorbance (%)	95	95	95
Emissivity (5)	5	5	5

Outros equipamentos usados no projeto foram um vaso de expansão, uma bomba de circulação, um controlador diferencial de temperatura e um tanque para armazenar a água.

O diagrama da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o percurso a água no Sistema construído por Finn (FINN, 2015).

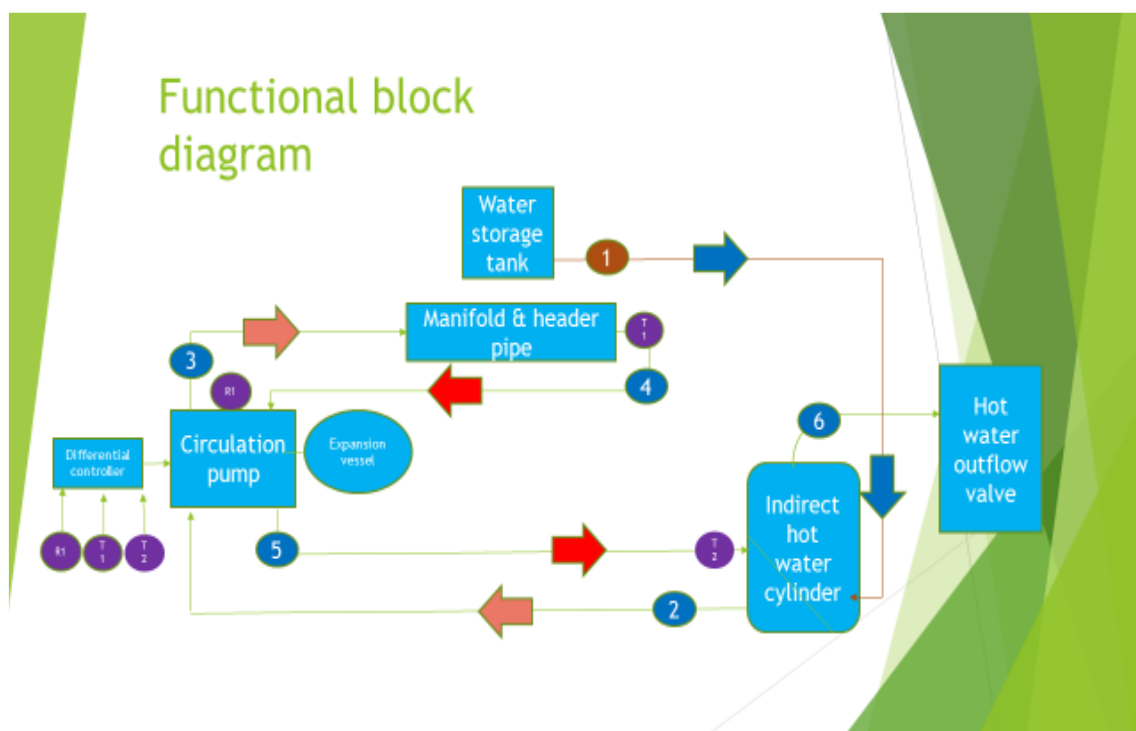


Figura 12 Diagrama do sistema construído por Finn

3.2 Estrutura luminosa

Como dito anteriormente, para testar o coletor solar dentro do laboratório, foi necessário construir uma estrutura que simulasse a quantidade de radiação recebida pelo coletor no ambiente externo.

3.2.1 Fonte de calor

O projeto da cobertura foi iniciado pela escolha do tipo de fonte de calor a ser usada. Entre as opções mais prováveis estavam as lâmpadas de infravermelho e as lâmpadas halógenas. As características observadas para esta seleção foram três: a quantidade de calor emitido, a facilidade de achar a lâmpada no Mercado e o custo do equipamento.

Uma comparação entre os preços de uma lâmpada de infravermelho e uma lâmpada halógena mostra que o custo da primeira é maior em relação a segunda. Lâmpadas de infravermelho são usadas em tratamentos médicos e criação de pássaros. Esta aplicação específica que justifica o custo mais alto. Bulbos halógenos são facilmente encontrados em lojas de equipamento elétrico, ou até mesmo em supermercados, pois são amplamente usados em iluminação externa, tanto em residências quanto em comércios e indústrias.

Lâmpadas halógenas são vendidas em diferentes tamanhos e potências. A potência total da fonte de calor foi estimada em 1600 W, já que a radiação que atinge a atmosfera terrestre é estimada em 1366 W/m² (ZIRIN). Para atingir este valor, foi decidido pelo uso de quatorze lâmpadas halógenas de 120 W (1680 W no total, 1688 W/m² considerando a área de absorção do coletor). As lâmpadas são vendidas em um holofote típico de instalações externas.



Figura 13 Holofotes

3.2.2 Estrutura Metálica

O material para construir o suporte das lâmpadas foi praticamente todo reciclado. A estrutura é composta por tubos de aço de 25x25 mm, 50x50 mm, 50x25 mm e perfis 40x40 mm de alumínio.



Figura 14 Perfil metálico 25x25



Figura 15 Perfil metálico 50x25



Figura 16 Perfil de alumínio 40x40



Figura 17 Perfil metálico 50x50

O design da estrutura foi desenvolvido para garantir dois requisitos. Primeiro, o posicionamento ajustável das lâmpadas em diferentes ângulos de aplicação. Segundo, permitir o uso da mesma estrutura em futuras aplicações.

Para garantir os diferentes posicionamentos do conjunto de lâmpadas, foram usadas duas juntas articuladas, como mostram as figuras **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**



Figura 18 Junta articulada para ajustar o ângulo

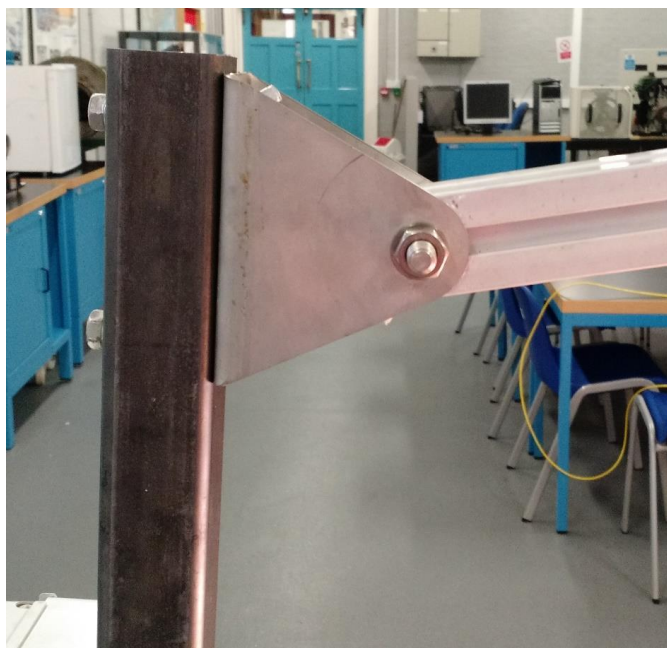


Figura 19 Junta articulada para ajustar a altura

Para a construção de uma estrutura universal e não uma estrutura para ser empregada apenas a esse projeto, a fonte de calor não tem dependência (apoio ou encaixe) com a estrutura desenvolvida por Finn (FINN, 2015).



Figura 20 Fonte de calor



Figura 21 Fonte de calor

3.2.3 Instalação das lâmpadas

As lâmpadas foram instaladas buscando cobrir toda a área do coletor solar. Como pode ser visto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** os holofotes foram colocados em quatro linhas, duas com três unidades e duas com quatro unidades, distanciadas de forma a conseguir a melhor distribuição do calor gerado. O máximo espaçamento entre dois holofotes foi 80 mm, o que é menos do que os 150 mm recomendados pela British Standards para testes em simuladores solares (SHATAT et al, 2013).



Figura 22 Layout dos holofotes

O material usado na instalação das lâmpadas foi:

- Cinco metros de fiação elétrica 1,25mm dois núcleos;
- Quatorze parafusos M6 de cabeça sextavada;
- Quatorze porcas M6;
- Dois interruptores On-Off;
- Protetor de linha RCBO Hager;
- Um metro de fiação elétrica 0,75 dois núcleos.

As lâmpadas foram divididas em dois grupos de sete. Cada grupo foi conectado em série e posteriormente conectado a um interruptor. Para a ligação em série foi usada a fiação de 1,25 mm. A fiação de 0,75 mm foi usada para a instalação interna dos interruptores e do protetor de linha.



Figura 23 Interruptores da fonte de calor

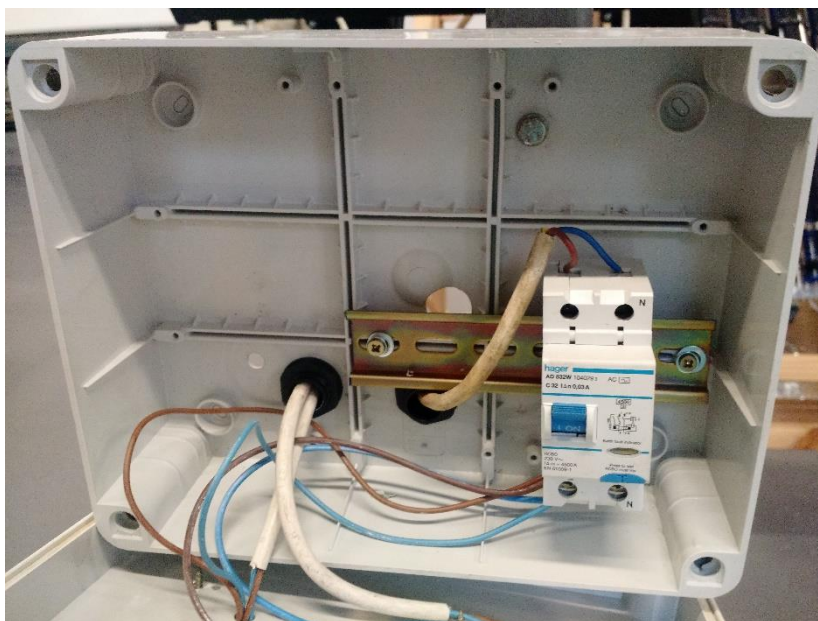


Figura 24 RCBO dentro da caixa de interruptores

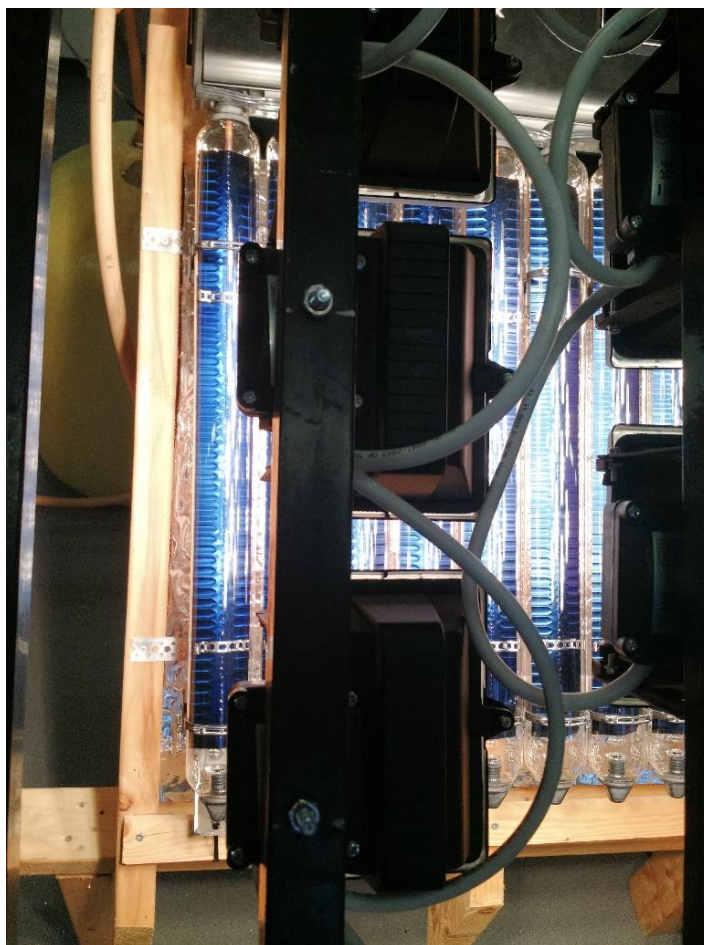


Figura 25 Holofotes conectados em série



Figura 26 Detalhe da conexão dos holofotes

3.3 Testando a radiação

3.3.1 Distância entre o coletor solar e a fonte de calor

A intensidade da luz foi medida com um piranômetro CP3 com sensibilidade de $14,44 \mu\text{V/W/m}^2$. O instrumento foi conectado a um multímetro Fluke 189 ajustado para ler millivolts em corrente contínua (mV DC) como mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** O piranômetro foi instalado em três diferentes distâncias da fonte de calor: 30, 50, 70 cm, e testado em duas posições diferentes, como mostrado nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Esta última medida foi tomada para verificar a diferença entre a radiação atingindo o centro do coletor e as suas bordas, bem como a variação da diferença conforme afastava a fonte de calor do coletor.

Para a leitura correta, o piranômetro foi instalado na estrutura, logo ao lado dos tubos, como mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Para testar o piranômetro nesta posição, a fonte de calor foi reposicionada logo acima do dispositivo.

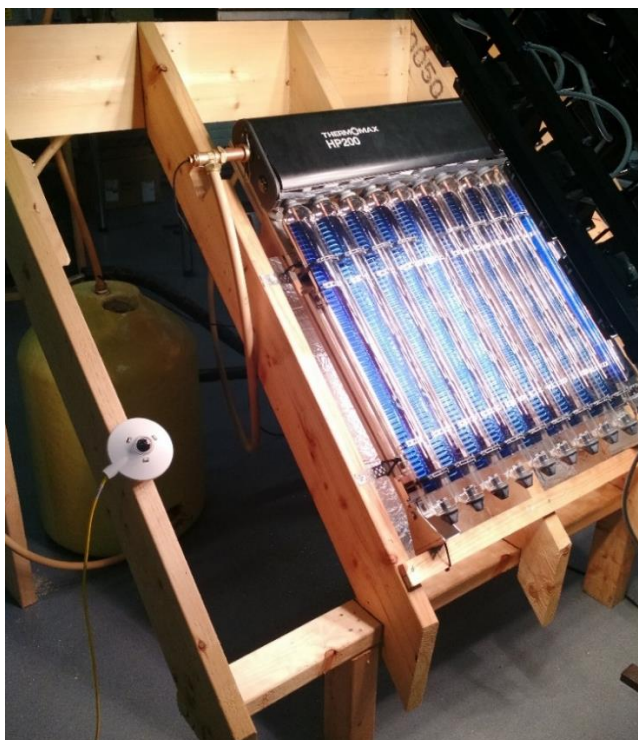


Figura 27 Piranômetro instalado na estrutura



Figura 28 Multímetro ajustado para mV DC

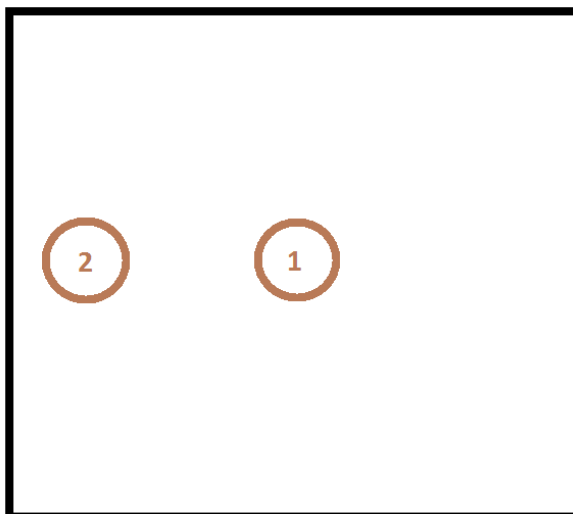


Figura 29 Ilustração das posições de teste do piranômetro

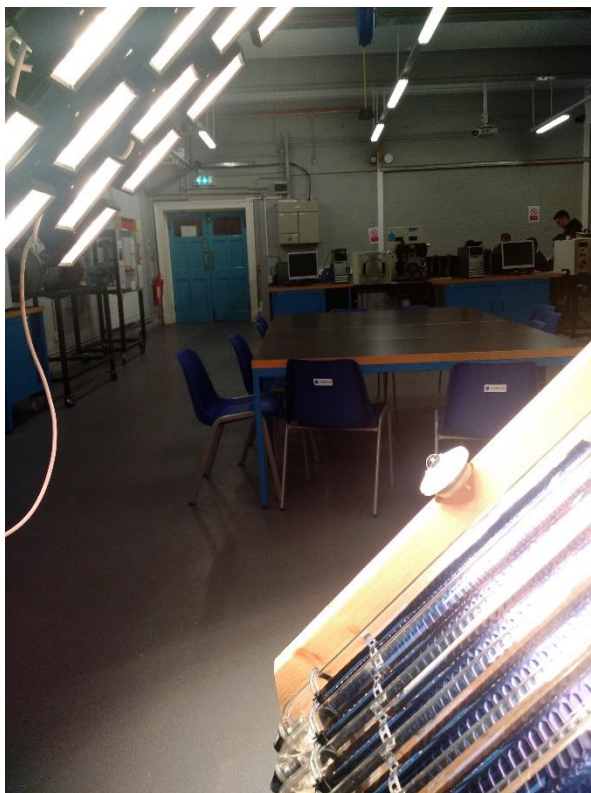


Figura 30 Piranômetro durante o teste

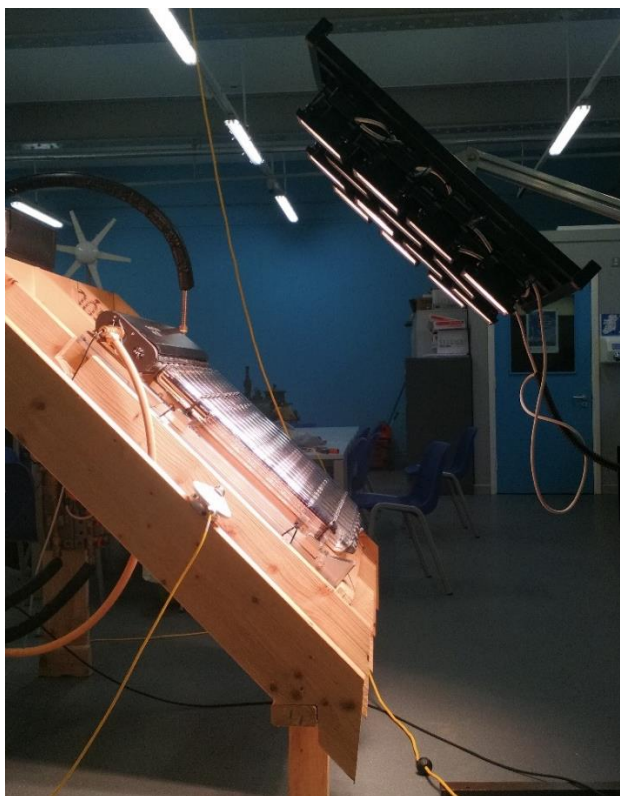


Figura 31 Piranômetro durante o teste

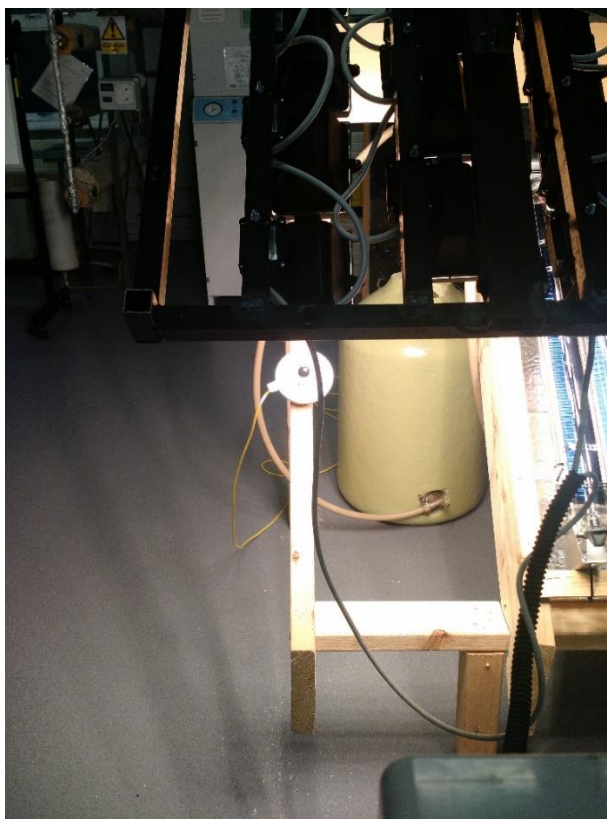


Figura 32 Piranômetro durante o teste na posição 2

Para calcular a radiação foi usada a formula dada pelo fabricante do piranômetro:

$$E_{solar} = \frac{U}{S}$$

Onde:

E_{solar} : radiação [W/m²]

U: voltagem medida pelo multímetro [V]

S: sensibilidade do piranômetro [V/W/m²]

Como os valores de voltagem mudavam levemente, a média de cinco medidas, tiradas num intervalo de dez segundos, foi usada para o cálculo da radiação. Pode ser notado que a diferença entre a radiação medida no centro e nas bordas decresce enquanto a distância aumenta.

Tabela 7 Medidas do teste de radiação

Posição	Distância (cm)	Medidas (mV)					Média	E (W/m ²)
		1	2	3	4	5		
1	30	21.65	21.66	21.66	21.66	21.68	21.663	1500.24
1	50	13.82	13.82	13.81	13.82	13.84	13.828	957.60
1	70	8.351	8.350	8.332	8.330	8.345	8.342	577.67
2	30	14.93	14.93	14.93	14.93	14.92	14.934	1034.21
2	50	10.28	10.27	10.27	10.26	10.23	10.264	710.84
2	70	7.162	7.155	7.154	7.166	7.179	7.1632	496.06

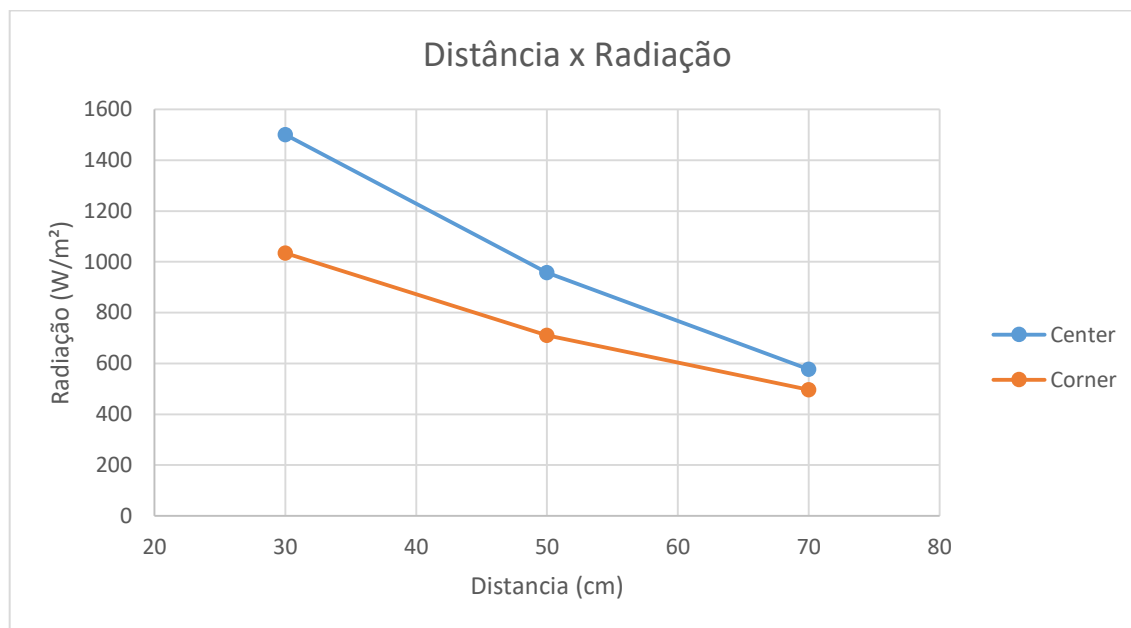


Figura 33 Gráfico da radiação nas diferentes distâncias de teste

Tabela 8 Taxa em que a distância influencia a distribuição da radiação

Distância (cm)	Diferença 1-2 (W/m²)	Taxa
30	466,04	31%
50	246,76	26%
70	81,61	14%

A taxa da diferença entre a radiação medida no centro e na borda foi menor quando a distância foi de 70 cm. Essa taxa de menos de 15% é compatível com os valores da British Standards para testes de simuladores solares (SHATAT et al, 2015). Mesmo que os outros valores não foram compatíveis com a norma britânica, os testes seguintes foram executados nas três distâncias descritas, devido ao fato de que a baixa radiação com a distância de 70 cm estava dando resultados numa velocidade muito lenta.

3.3.2 Cruzando dados com a radiação real na Irlanda

Para simular um dia real na Irlanda foi preciso saber quantas horas a fonte precisaria permanecer ligada. Considerando a radiação média diária em cada mês e a radiação emitida pela fonte de calor:

$$\text{Horas operando} = \frac{\text{Radiação diária}}{\text{Radiação da fonte de calor}}$$

Tabela 9 Horas de operação necessárias para que a fonte de calor simule o clima irlandês (primeiro semestre)

Horas de operação para atingir a radiação diária comum a cada mês na Irlanda						
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
kWh/m²/dia	0,648	1,266	2,303	3,649	4,707	4,875
30 cm	0,43	0,84	1,54	2,43	3,14	3,25
50 cm	0,68	1,32	2,41	3,81	4,92	5,09
70 cm	1,12	2,19	3,99	6,32	8,15	8,44

Tabela 10 Horas de operação necessárias para que a fonte de calor simule o clima irlandês (primeiro semestre)

Horas de operação para atingir a radiação diária comum a cada mês na Irlanda						
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
kWh/m²/dia	4,558	3,809	2,782	1,628	0,827	0,497
30 cm	3,04	2,54	1,85	1,09	0,55	0,33
50 cm	4,76	3,98	2,91	1,70	0,86	0,52
70 cm	7,89	6,59	4,82	2,82	1,43	0,86

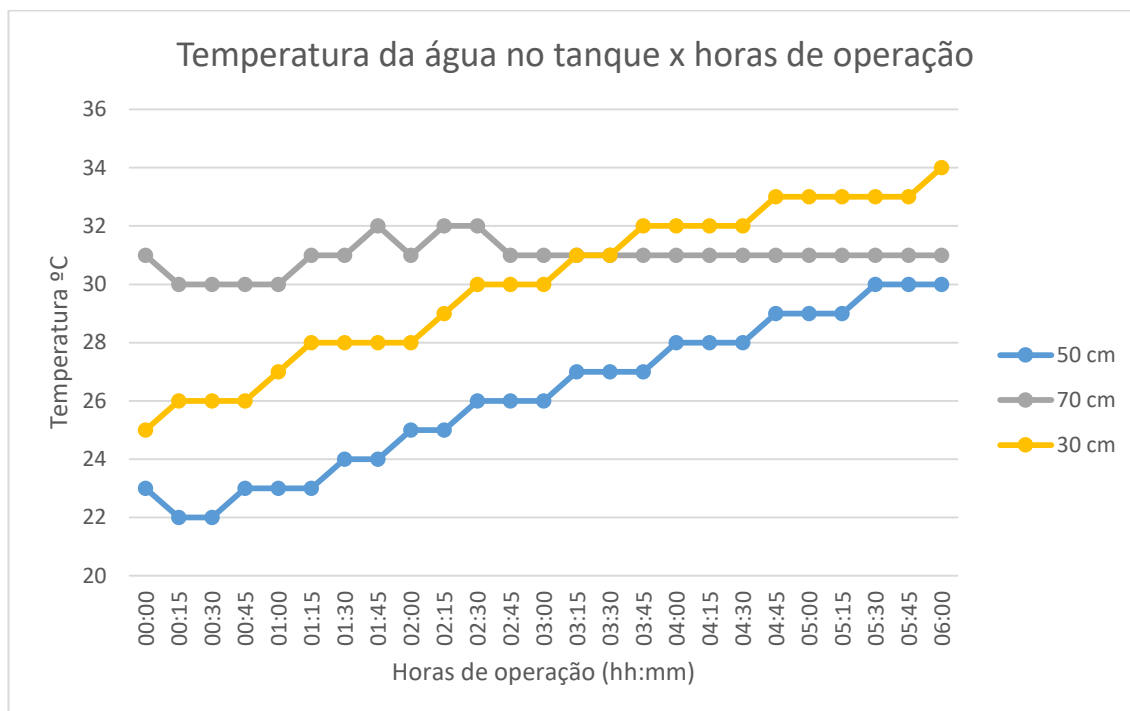


Figura 34 Temperatura no tanque versus tempo de operação

Consultando o gráfico mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível saber quanto a temperatura aumenta em um dia comum a cada mês do ano. Os resultados são mostrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 11 Aumento da temperatura da água em um dia a cada mês do ano

Aumento de temperatura da água em um dia em cada mês nas três distâncias de teste						
Distância	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
30	1	2	3	5	5	6
50*	0	2	4	6	7	7
70**	0	0	0	0	0	0
Distância	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
30	5	5	3	2	1	1
50*	7	6	4	2	1	0

70**	0	0	0	0	0	0
-------------	---	---	---	---	---	---

* O decréscimo nos primeiros 15 minutos foi ignorado

** A temperatura não aumentou, então este teste foi descartado

3.4 COMISSIONAMENTO

3.4.1 Estação de enchimento

A estação de enchimento é o sistema que assiste o enchimento do sistema de aquecimento de água. O bombeamento causa o rápido escoamento do líquido, e graças a esta pressão, bolhas de ar são expulsas da tubulação.



Figura 35 Estação de enchimento

Primeiramente, a estação de enchimento foi posicionada próxima ao sistema de aquecimento de água. A mangueira de pressão foi conectada a saída da bomba e a mangueira de retorno foi posicionada no topo do reservatório. A saída do reservatório foi conectada a entrada da bomba. Finalmente, o reservatório foi enchido de água (DIMPLEX).



Figura 36 Mangueira de pressão conectada à saída da bomba



Figura 37 Mangueira de retorno posicionada no reservatório



Figura 38 Saída do reservatório conectada à entrada da bomba

As válvulas de enchimento estavam fechadas, como mostrado na **Erro! Fonte e referência não encontrada.** Então, elas foram abertas e a mangueira de pressão foi conectada a válvula superior da unidade de bombeamento do sistema de aquecimento de água. A seguir, a mangueira de retorno foi conectada a válvula inferior da unidade de bombeamento (DIMPLEX).

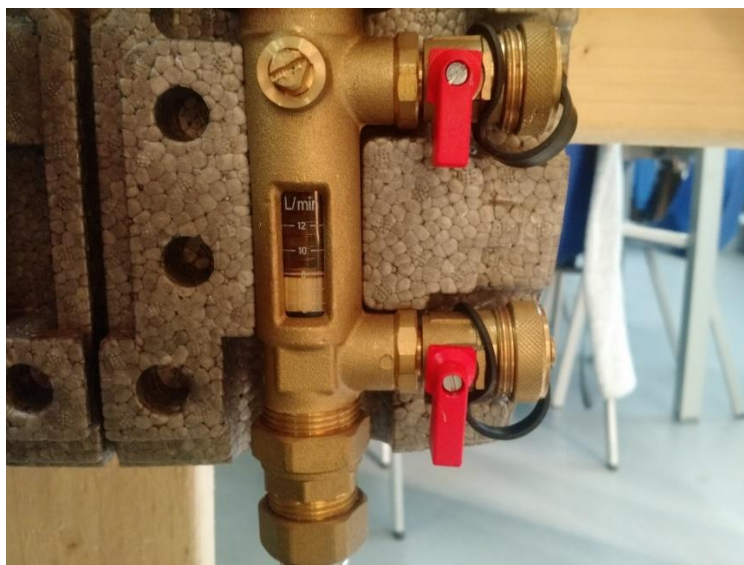


Figura 39 Válvulas da estação de bombeamento fechadas



Figura 40 Mangueira de pressão na porta superior e mangueira de retorno na porta inferior

A válvula sob o reservatório foi aberta. A bomba foi ligada e todas as conexões foram checadas para evitar vazamentos. O circuito foi enchido até todo o ar sair. Uma vez que o sistema foi completamente enchido, as válvulas foram posicionadas conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** para pressurizar o sistema.

Quando a pressão desejada foi atingida, as válvulas foram fechadas novamente (DIMPLEX).

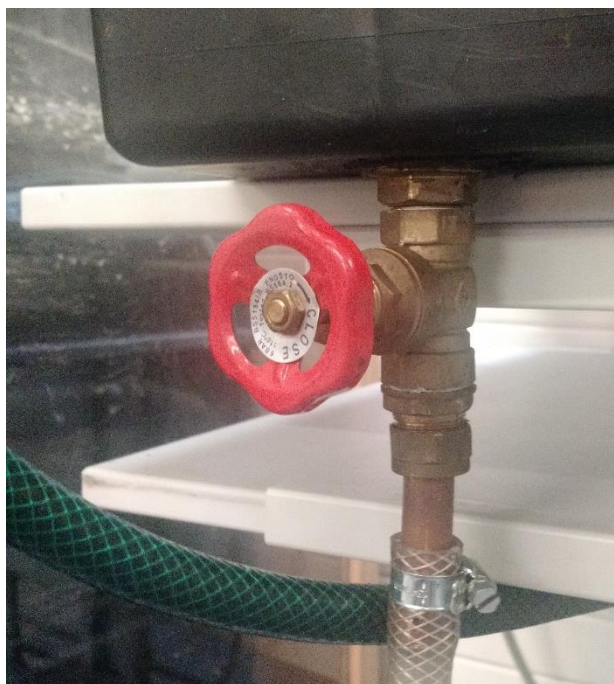


Figura 41 Válvula sob o reservatório



Figura 42 Posicionamento das válvulas para a pressurização do sistema

Por fim, a bomba foi desligada e logo em seguida as válvulas foram fechadas. O medidor de pressão da unidade de bombeamento foi checado para garantir que a pressão correta tenha sido atingida. A válvula sob o reservatório foi fechada.

Para retirar o sistema de enchimento, a mangueira de retorno foi desconectada nas duas extremidades e esvaziada no reservatório. A mangueira de pressão foi desconectada da bomba e esvaziada no reservatório (DIMPLEX).

3.4.2 Controlador de temperaturas

Antes de ligar o aquecimento, é necessário configurar o controlador de temperaturas Kingspan SC300. Primeiramente as conexões elétricas foram verificadas para garantir que a instalação foi feita corretamente (KINGSPAM SOLAR, 2015) durante a montagem do sistema realizada por Finn (FINN, 2015).

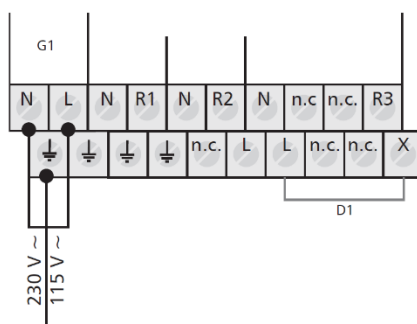


Figura 43 Ligação elétrica no controlador

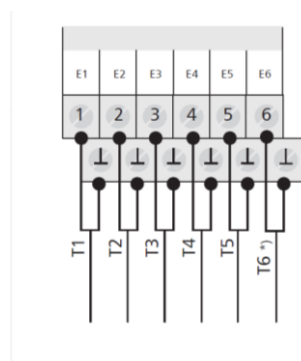


Figura 44 Conexão dos sensores no controlador

O controlador tem quatro botões de navegação no display: set, esc, seta para cima e seta para baixo. Em todos os casos deste comissionamento, as setas são usadas para seleção, o botão SET é usado para confirmar e ESC para sair da configuração. Com o interruptor do controlador na posição OFF, o display para escolha da linguagem é exibido (KINGSPAM SOLAR).

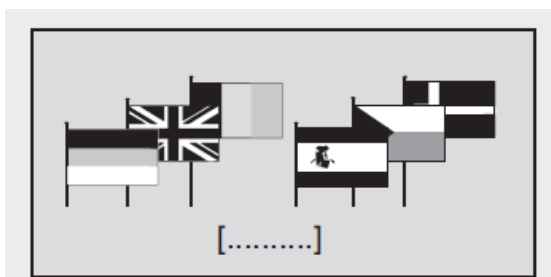


Figura 45 Display de seleção de linguagem

Com a opção de língua inglesa escolhida o display para inserir o horário foi exibido. Hora, minutos, dia, mês e ano foram inseridos consecutivamente nessa ordem. O próximo display mostra a opção de fazer o horário de verão ser alterado automaticamente. Esta função foi ativada e o display para escolha do Grupo do Sistema foi exibido (KINGSPAM SOLAR).



Figura 46 Display de configuração de hora e data

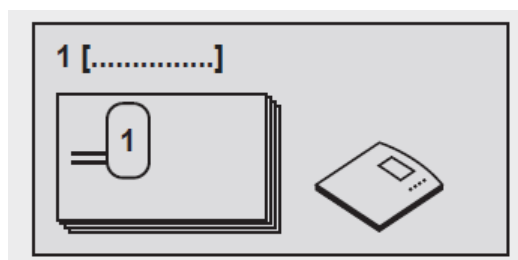


Figura 47 Display de seleção do grupo

O controlador tem quarenta sistemas subdivididos em sete grupos. Para esta aplicação o Grupo 1 foi selecionado (sistema com um tanque de armazenamento). Depois disso, o display para escolha do sistema apareceu. O Sistema 1 foi selecionado (Sistema 1: 1 coletor – 1 tanque de armazenamento) (KINGSPAM SOLAR).

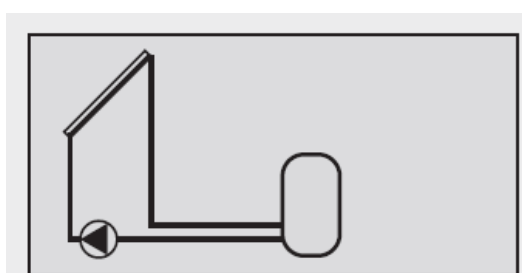


Figura 48 Display de seleção do sistema

O interruptor do controlador foi posto na posição MANUAL para permitir a seleção de quantas bombas estarão em funcionamento no sistema. Apenas R1 é configurada como ON, o que significa que só terá uma bomba em operação. E assim termina o comissionamento do controlador de temperaturas (KINGSPAM SOLAR).

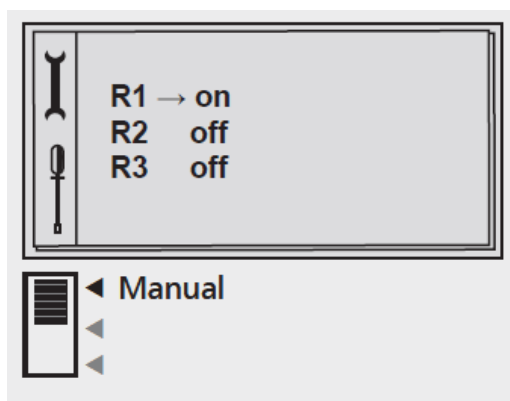


Figura 49 Display de seleção das bombas em operação

3.4.3 Ligando o aquecimento

Depois de o sistema estar preenchido com água e o controlador configurado, foi possível iniciar o processo de aquecimento da água. Para isso, a taxa de fluxo foi ajustada para 1 litro por minute, como sugerido pelo manual da Kingspan Solar. Depois, o controlador foi colocado em modo automático e as lâmpadas da fonte de calor foram ligadas.

4 CÁLCULOS

Para validar o sistema, alguns cálculos foram necessários. Estes cálculos retornaram dados importantes para entender como o sistema estava trabalhando. Se o sistema tivesse alguma perda de calor, esses cálculos poderiam mostrar onde a perda ocorreu, tornando possível futuras correções.

4.1 Energia para aquecer a água

Se não tivéssemos nenhuma perda no sistema, a quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura no tanque de armazenamento seria dada pela equação:

$$E = C_p * \Delta T * V$$

Onde:

E: energia [kJ]

Cp: calor específico da água [kJ/kg°C]

Delta T: diferencial de temperatura

4.2 Eficiência do coletor

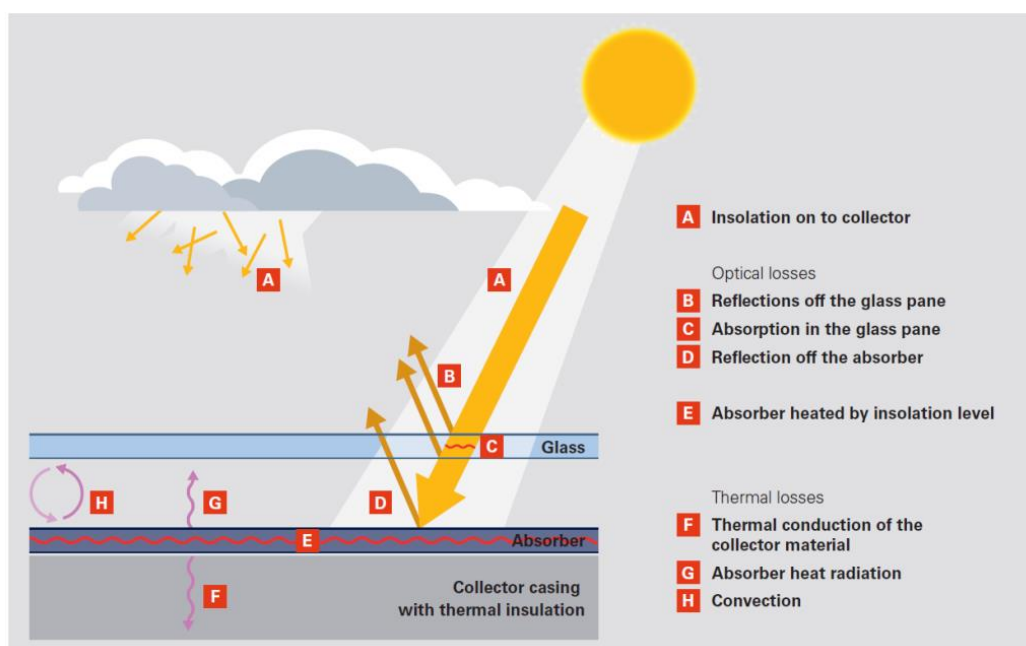


Figura 50 Irradiação que atinge o coletor

A eficiência do coletor é dada pela equação (SOLAR DISTRICT HEATING, 2012):

$$\eta_c = \eta_0 - a_1 * \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 * \frac{(T_m - T_a)^2}{G}$$

Onde:

η_c : Eficiência do coletor

η_0 : Máxima eficiência se não houvesse perda de calor, também conhecida como eficiência ótica.

a_1 : coeficiente de perda de calor de primeira ordem [W/(K.m²)]

a_2 : coeficiente de perda de calor de segunda ordem [W/(K².m²)]

G: radiação total (global) na superfície do coletor [W/m²]

T_m : Temperatura média do fluido do coletor [°C]

T_a : Temperatura do ar ambiente entre o coletor e a fonte de calor [°C]

4.3 Eficiência do sistema

A eficiência do sistema é dada pela equação (SUKHATME, 1998):

$$\eta_s = \frac{m * C_p * (T_{sc,i} - T_{sc,o})}{G * A}$$

Onde:

η_s : eficiência do sistema

m : fluxo de massa [kg/s]

C_p : calor específico do fluido solar [J/(Kg.K)]

G : radiação total (global) na superfície do coletor [W/m²]

$T_{sc,i}$: temperatura de entrada no tanque de armazenamento [°C]

$T_{sc,o}$: temperatura de saída no tanque de armazenamento [°C]

A : área do coletor [m²]

Com um gadget FLIR (Flir One) conectado a um smartphone, algumas fotografias térmicas foram tiradas para que fosse possível enxergar se existia calor escapando do sistema.

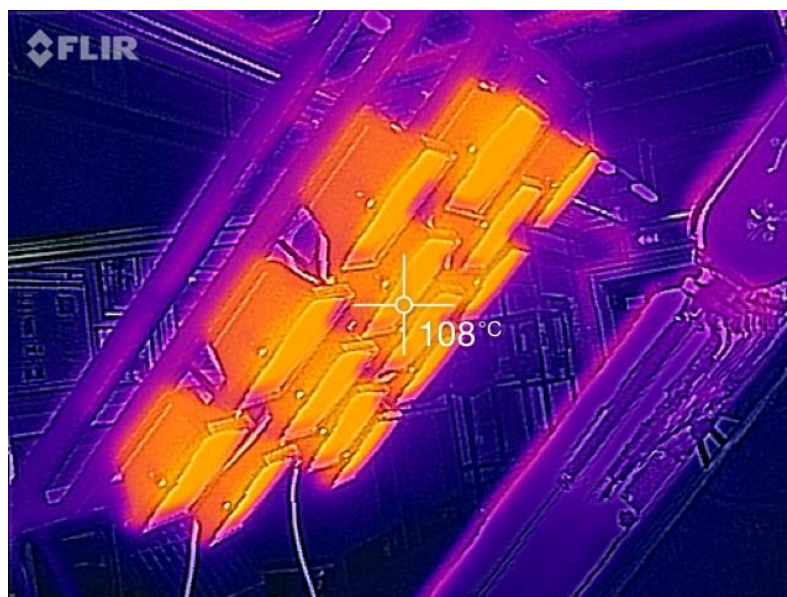


Figura 51 Imagem térmica FLIR dos holofotes

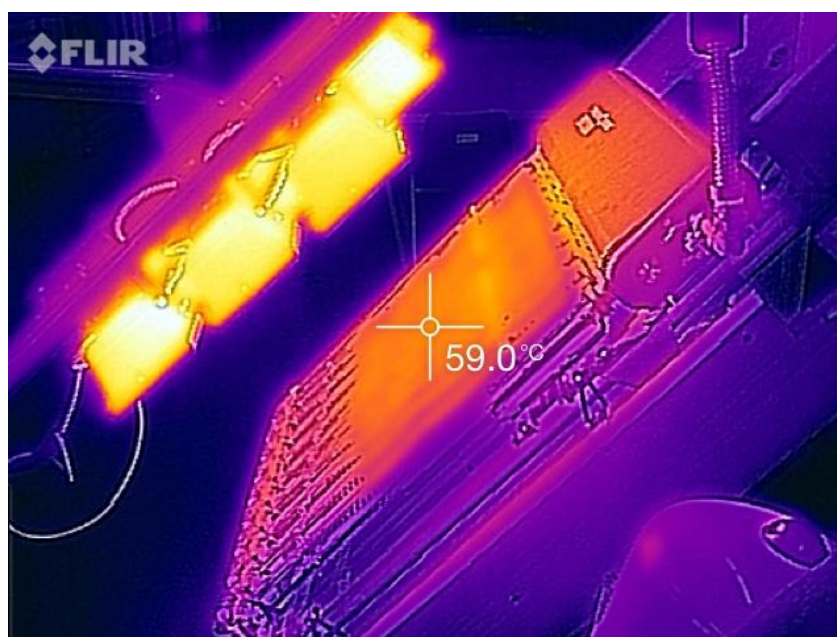


Figura 52 Imagem térmica FLIR do coletor

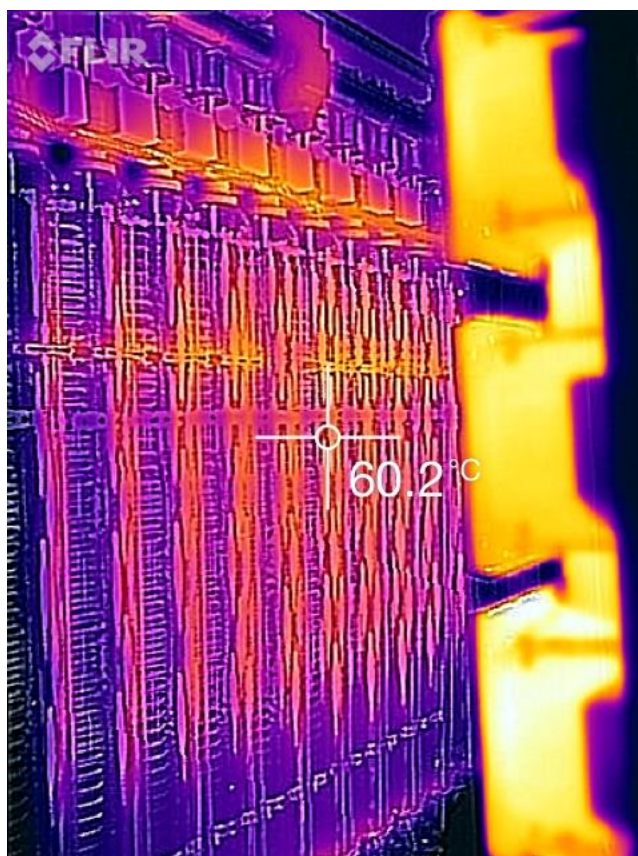


Figura 53 Imagem térmica FLIR do coletor



Figura 54 Imagem térmica FLIR da saída do coletor



Figura 55 Imagem térmica posterior da estrutura



Figura 56 Imagem térmica da estação de bombeamento

4.4 Eficiência global

Chama-se de eficiência global a combinação entre a eficiência do coletor e a eficiência do sistema, e é calculada usando a seguinte equação:

$$\eta_G = \eta_c * \eta_s$$

Onde:

η_G : Eficiência global

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Aumento da temperatura da água

Os próximos três gráficos mostram o aumento da temperatura na entrada do coletor (T1) e na saída do tanque de armazenamento (T2).

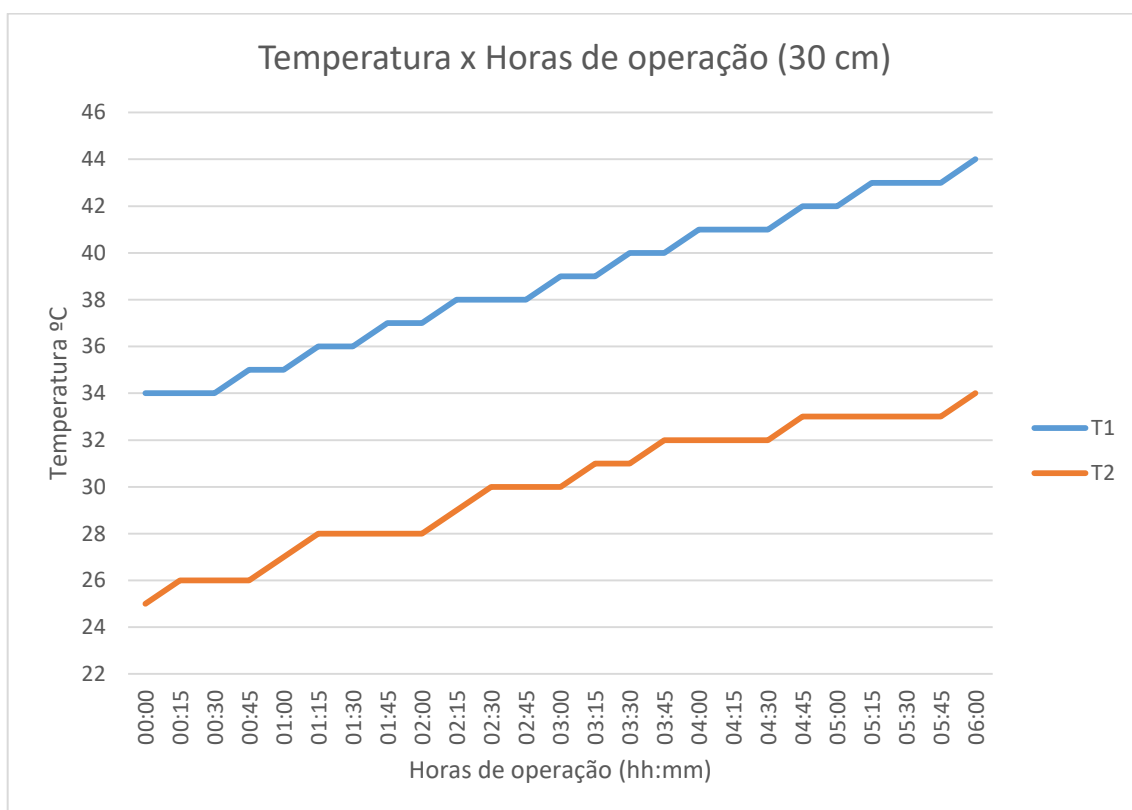


Figura 57 Gráfico do teste a 30 cm (1,5 kW/m²)

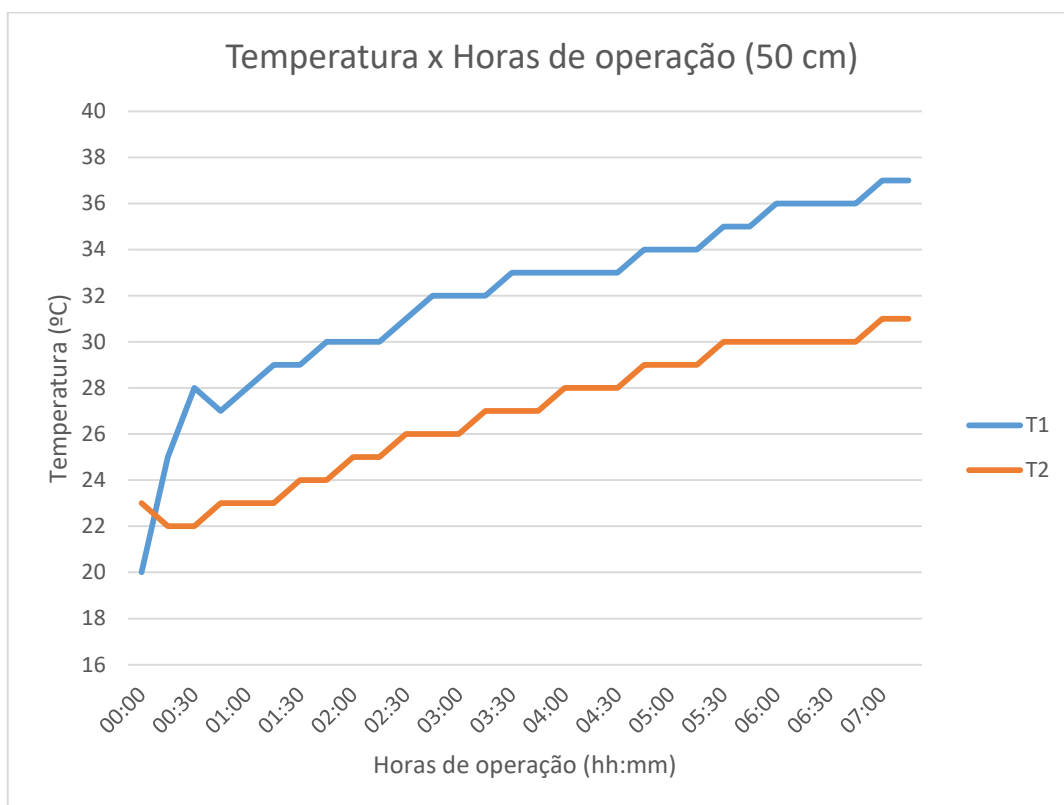


Figura 58 Gráfico do teste a 50 cm (0,95 kW/m²)

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra que a elevação de temperatura quando a emissão era de 1,5 kW/m², foi de 9 graus em seis horas. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra que o aumento da temperatura quando a emissão era de 0,9 kW/m², foi de 9 graus em sete horas. Este gráfico também mostra o comportamento da bomba. Percebeu-se que a temperatura inicial na saída do coletor aumenta, mas a temperatura no tanque permanece estável. Quando a diferença de temperatura nos dois pontos atinge 6 graus, a bomba liga. Após isso, ambas as temperaturas aumentam similarmente.

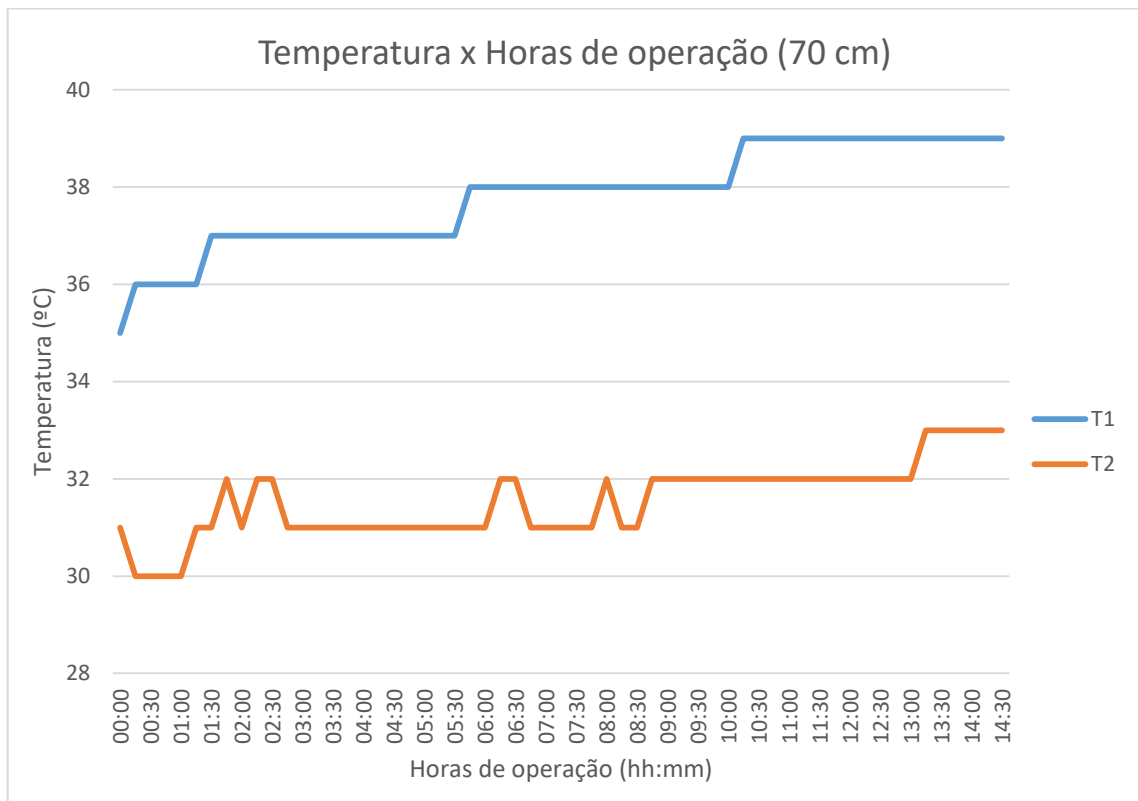


Figura 59 Gráfico do teste a 70cm (0,57 kW/m²)

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o mesmo para a distância de 70 cm, porém, com uma temperatura inicial de 30 graus, o sistema não mostrou a resposta esperada, deixando a temperatura quase constante. A temperatura aumentou apenas 3 graus em quatorze horas de experimento.

1.1. Energia para aquecer a água

A quantidade de energia requerida para aquecer a água a uma temperatura de 40 graus, desconsiderando as perdas, seria:

$$E = C_p * \Delta T * V$$

$$E = 4,2 * (60 - 20) * 90$$

$$E = 15120 \text{ kJ}$$

$$E = 4,2 \text{ kWh}$$

5.2 Eficiência do coletor

$$\eta_c = \eta_0 - a_1 * \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 * \frac{(T_m - T_a)^2}{G}$$

Onde:

η_c : Eficiência do coletor

η_0 : Máxima eficiência se não houvesse perda de calor, também conhecida como eficiência ótica = 0,726 (da folha de dados do coletor)

a_1 : coeficiente de perda de calor de primeira ordem [W/(K.m²)] = 1,55 (da folha de dados do coletor)

a_2 : coeficiente de perda de calor de segunda ordem [W/(K².m²)] = 0,0058 (da folha de dados do coletor)

Tabela 12 Eficiência do coletor

Eficiência do coletor	
G= 1,5 kW/m²	71,75%
G= 0,9 kW/m²	72,92%

5.3 Eficiência do sistema

$$\eta_s = \frac{m * C_p * (T_{sc,i} - T_{sc,o})}{G * A}$$

Onde:

m : fluxo de massa [kg/s] = 2 [l/min] = 0,0333 [kg/s]

C_p : calor específico do fluido solar [J/(Kg.K)] = 3,93 [kJ/(Kg.K)] (assumindo Monoetilenoglicol 20%)

G : radiação total (global) na superfície do coletor [W/m²]

$T_{sc,i}$: temperatura de entrada no tanque de armazenamento [°C]

$T_{sc,o}$: temperatura de saída no tanque de armazenamento [°C]

A: área do coletor [m²] = 1,007 [m²]

Esta equação usa o calor específico do fluido solar, mas a composição deste fluido não é conhecida. Então foi assumido ser monoetilenoglicol a 20%. O fluxo de massa no sistema era de dois litros por minuto e as temperaturas usadas foram as de entrada e saída do tanque de armazenamento.

Para ter as temperaturas na saída do tanque foi preciso anotar os valores medidos no termômetro analógico na saída da estação de bombeamento. Essa anotação só foi realizada no teste feito com distância de 30 cm entre a fonte de calor e o coletor. Então a eficiência do sistema só foi calculada para este caso.

Tabela 13 Eficiência do sistema

Eficiência do sistema	
G= 1,5 kW/m²	43,36%

5.4 Eficiência global

$$\eta_G = \eta_c * \eta_s$$

$$\eta_G = 0,7175 * 0,4336$$

$$\eta_G = 31,11\%$$

5.5 Perdas de temperatura

Dados do teste a 30 cm de distância entre a fonte de calor e o coletor são mostrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..** A diferença entre a saída do coletor (T1) e a entrada da estação de bombeamento (T3) nos dá a temperatura perdida no tubo plástico entre esses dois pontos.

Tabela 14 Perda de temperatura no tubo plástico

T1 (°C)	T3 (°C)	T1 – T3
44	40	4 °C
45	40	5 °C
45	42	3 °C
45	42	3 °C
46	42	4 °C
46	42	4 °C
46	42	4 °C
46	42	4 °C
47	42	5 °C
47	42	5 °C
47	42	5 °C
47	44	3 °C
48	44	4 °C
48	44	4 °C
48	44	4 °C
48	44	4 °C
Média		4 °C

Uma média de 4 °C estava sendo desperdiçada nos três metros de tubo plástico entre a saída do coletor e a entrada da estação de bombeamento. Este tubo não é adequado a esta aplicação. Tubulação, de e para painéis solares é normalmente feita de aço flexível com isolamento de alta temperatura (RENEWABLE INSTALLER TRAINNER).

5.6 Tanque de armazenamento

O isolamento do tanque foi avaliado com o sistema desligado e monitorando o comportamento da temperatura da água em seu interior. Como mostrado na **Erro! fonte de referência não encontrada.**, em 21 horas a água no tanque resfriou 9 graus, isto é, um decréscimo de um grau a cada duas horas e vinte minutos.

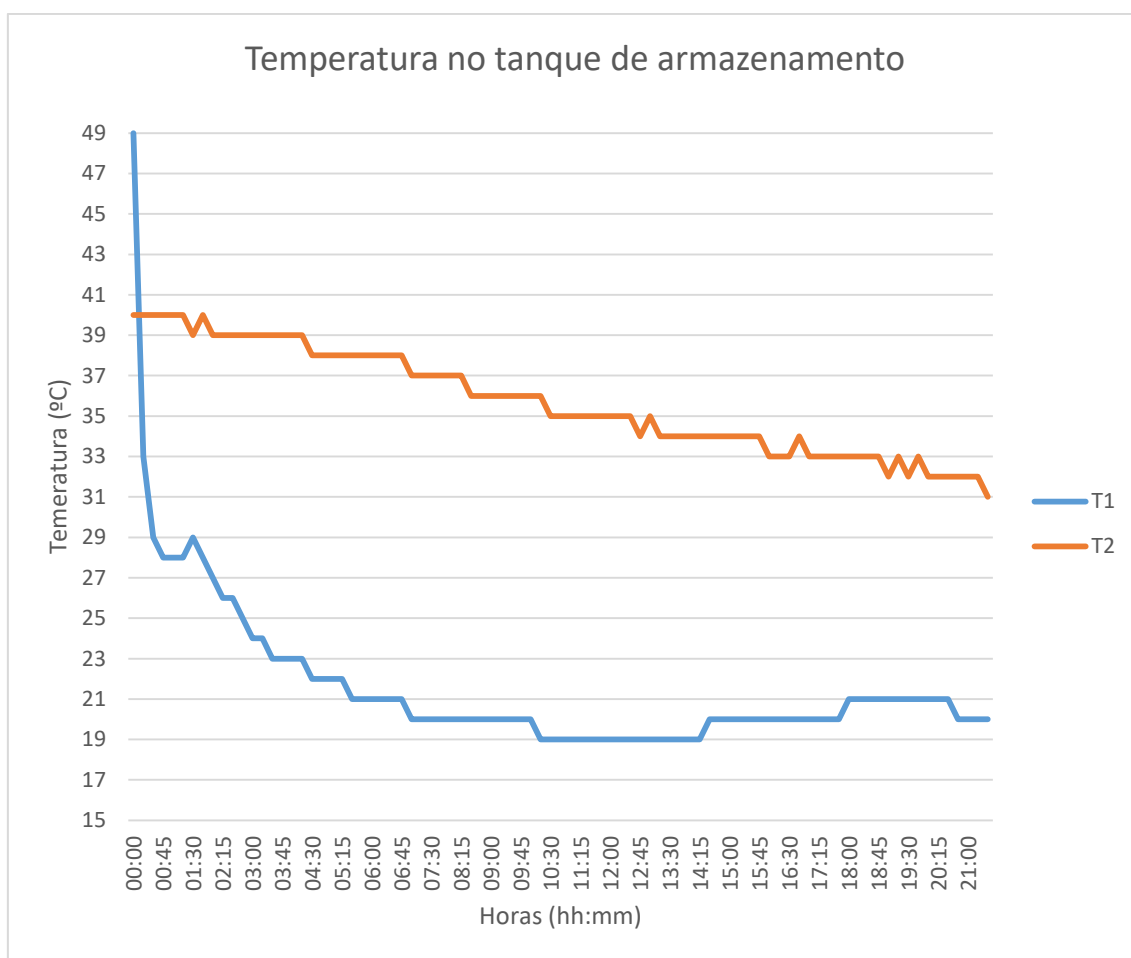


Figura 60 Gráfico do decréscimo de temperatura no tanque depois de desligar a fonte de calor

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

Durante os testes, foi possível observar diversos comportamentos interessantes do sistema. Foi percebido que os sensores forneceram dados importantes que devem ser usados para a melhora do desempenho do sistema. Por exemplo, os dois termômetros analógicos na estação de bombeamento marcaram temperaturas iguais praticamente o tempo todo. A diferença de marcação nesses dispositivos mostraria que a troca de calor estaria ocorrendo a uma taxa satisfatória no tanque de armazenamento, já que um está posicionado antes do tanque e o outro depois. Sem identificar essa diferença, pode-se concluir que a troca de calor entre a água quente da serpentina e a água fria do tanque ocorre de maneira bem lenta. Isso leva a outra conclusão, como a troca de calor no tanque depende da estratificação da água aquecida, conclui-se que a estratificação no tanque é inadequada.

Outro ponto notado, muito importante para a performance do sistema, é a perda de calor ocorrendo no tubo plástico que conecta a saída do coletor com a entrada da estação de bombeamento. São perdidos quatro graus nos três metros de tubulação. Perda demasiada levando em conta se tratar de um coletor solar que opera em um ambiente com pouca radiação solar. Como mencionado no texto, é recomendado o uso de aço flexível isolado para tubulações aplicadas em sistemas de aquecimento de água.

Como mostrado nas imagens térmicas, perda de calor também ocorre nas extremidades das tubulações, pelo simples fato de que o isolamento não cobre o tubo todo.

Ainda falando sobre isolamento, o correto funcionamento do isolamento das portas atrás do coletor é muito importante para a aplicação a qual a estrutura foi construída. Acessar o coletor através do interior da casa é uma das especificações que justificam o projeto de Finn (FINN, 2015). Se houvesse calor excessivo sendo transferido para o interior da casa, a facilidade de manutenção, conforto dos habitantes e outros fatores seriam afetados. Novamente olhando para as imagens

térmicas, nota-se que o isolamento das portas funciona bem, bem como o isolamento do tanque, que já havia sido provado perder um grau a cada duas horas e vinte minutos.

Com essas observações conclui-se que o sistema é bem-sucedido em armazenar calor no tanque, mas não está preparado para aquecer água de modo eficiente.

Também foi observado que a metodologia empregada não foi suficiente para obter resultados sólidos. Uma metodologia melhorada foi vislumbrada durante a obtenção dos resultados, e isso se deve à inexperiência do pesquisador. O fato de não haver bombeamento de água fria no tanque de armazenamento resultou que a água no tanque estava sempre morna no início dos testes. Como a água do tanque perdia calor muito lentamente, os testes seguiram com diferentes temperaturas iniciais, afetando os resultados. Por exemplo, no teste em que a fonte de calor foi mantida a 70 cm do coletor, a temperatura inicial no tanque era de 31 graus e permaneceu quase constante o teste todo. Talvez se a temperatura inicial fosse a temperatura ambiente, teria sido observado um desempenho melhor do coletor no início do teste.

6.2 Recomendações

Para resolver os problemas, algumas mudanças devem ser feitas. Primeiro, a troca do tubo plástico com um tubo de aço flexível. Segundo, providenciar isolamento por toda a extensão dos tubos.

Sobre a estratificação da água aquecida no tanque de armazenamento, é possível que um tanque maior e mais fino tenha uma performance melhor nessa função.

Eu também sugiro a adição do bombeamento de água fria, para que haja circulação no tanque de armazenamento, tornando a simulação mais real e os testes mais compreensíveis e padronizados.

Toda a análise do sistema depende dos sensores instalados. O controlador de temperaturas suporta um grande número de sensores. O uso dessa capacidade aumentaria o controle e entendimento do processo. Por exemplo, a temperatura ambiente entre a fonte de calor e o coletor deveria ser lida pelo controlador.

A fonte de calor mostrou grandes desvios na uniformidade da radiação. Um maior espaçamento entre os holofotes é suficiente para resolver esse problema.

Para os testes, um trabalho futuro pode realizar os mesmos testes evitando os erros cometidos neste trabalho. Eu sugiro a realização de testes de sombreamento, que é sempre interessante se tratando de energia solar. Obviamente, levar a estrutura para o ambiente externo e testá-lo em condições normais é um dos próximos passos.

Por fim, nos cálculos eu sugiro o cálculo da perda de calor tubo a tubo. Além disso, a análise da eficiência do sistema usando teoria de transferência de calor, tornando a análise mais próxima a este sistema específico.

7 REFERÊNCIAS

7.1 Livros, sites e jornais

[1] ALMEIDA, M. P., Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. São Paulo. Brasil. Universidade de São Paulo, 2012

[2] FINN, C., The Full Integration of a Solar Thermal Evacuated Tube System into a Roof Section Allowing for Internal Access. Dublin, Irlanda. Dublin Institute of Technology, 2015.

[3] GRIMM, A. M. Movimento da Terra, Estações Available at: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-1.html> Accessed 20/02/2016.

[4] PIDWIRNY M. Solar radiation. Available at: <http://www.eoearth.org/view/article/156098> Accessed 11/02/2016.

[5] ZIRIN, H., Solar Constant. Available at: <http://www.britannica.com/topic/solar-constant>. Accessed 10/02/2016.

[6] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 2008. Available at: http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf Accessed 10/02/2016.

[7] Dublin Airport. Available at: <http://www.weatheronline.co.uk/weather/> Accessed 10/02/2016.

[8] POULTER, S. Britain is among worst in Europe for quality of life despite higher average incomes. Available at: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-035458/Britain-worst-Europe-quality-life-despite-higher-average-incomes.html> Accessed 10/02/2016.

[9] DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. Solar engineering of thermal processes, Wiley, New York, 2006.

[10] Dublin, Ireland – Basic Information. Available at: <http://www.gaisma.com/en/location/dublin.html> Accessed on: 01/04/2016

[11] MET EIREANN. (2015). Mean values for Dublin up to 31-mar-2016. Available: <http://www.met.ie/climate/monthly-data.asp?Num=532>. Accessed on 20/02/2016

[12] KINGSPAM SOLAR. Thermo HP 200. Comercial Data Sheet.

[13] SHATAT, M., RIFFAT, S., AGYENIM, F. Experimental testing method for solar light simulator with an attached evacuated solar collector. International Journal of Energy and Environment. Volume 4, Issue 2, 2013 pp. 219-230

[14] Operation Instructions Flush and Fill Station for solar thermal systems. Available at: http://www.dimplex.co.uk/assets/Downloads_PDF/Installer_info/Solar_thermal/SOLFFP_Flush_And_Fill_Station_Instructions.pdf Accessed 10/02/2016.

[15] KINGSPAM SOLAR. Kingspan SC 300 Installation and operating instructions, 2010

[16] KINGSPAM SOLAR. Thermomax Installation guide. Available at: http://www.kingspansolar.co.uk/databasedocs/doc_7709692_thermomax_installation_manual_sep_11_lr.pdf. Accessed on: 25/03/2016

[17] SOLAR DISTRICT HEATING. Solar District Heating Guidelines, 2012. Available at: http://solar-district-heating.eu/portals/0/factsheets/sdh-wp3_fs-7-1_solarcollectors_version3.pdf Accessed on 20/03/2016

[18] SUKHATME, S.P., Solar energy: Principles of thermal collection and storage, 2nd ed., Tata McGraw-Hill, New Delhi, 1998.

[19] RENEWABLE INSTALLER TRAINNER. Solar Hot Water Installer Trainer Manual 2 ed.

[20] WILSON, A. Sunny Days Available at: [http://solarcoop.net/Downloads/AndyWilson\(article1\).pdf](http://solarcoop.net/Downloads/AndyWilson(article1).pdf) Accessed on: 25/03/2016

7.2 Referências de gravuras

Figura 3 Ilustração da lei do inverso do quadrado Em: <http://inversodoquadrado.comarduino.blogspot.ie/> (Accessed on 27/02/2016)

Figura 4 Altura do sol Em: http://www.esru.strath.ac.uk/Courseware/Design_tools/Sun_chart/sun-chart.htm (Accessed on 27/02/2016)

Figura 5 Média anual de luz do dia na Irlanda no período entre 1981 e 2010 Em: <http://www.met.ie/climate-ireland/sunshine.asp> (Accessed on 30/02/2016)

Figura 6 Média sazonal de luz do dia na Irlanda no período entre 1981 e 2010 Em: <http://www.met.ie/climate-ireland/sunshine.asp> (Accessed on 30/02/2016)

Figura 7 Diferenças sazonais da altura do sol Em: <http://www.diy-energy.org/how-to-install-solar-panels-on-your-roof-the-basics> (Accessed on 30/02/2016)

Figura 8 Ângulos referentes à orientação do coletor solar At: http://www.volker-quaschning.de/articles/fundamentals1/index_e.php. (Accessed on 16/02/2016)

Figura 9 Irradiação horizontal global At: <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI/> (Accessed on 30/02/2016)

Figura 10 Irradiação horizontal europeia At: <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI/> (Accessed on 30/02/2016)

Figura 11 Irradiação horizontal irlandesa At: <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI/> (Accessed on 30/02/2016)

Figura 12 Diagrama do sistema construído por Finn. Em: FINN, C., The Full Integration of a Solar Thermal Evacuated Tube System into a Roof Section Allowing for Internal Access.

Figura 43 Ligação elétrica no controlador. Em: KINGSPAM SOLAR. Kingspan SC 300 Installation and operating instructions, 2010

Figura 44 Conexão dos sensores no controlador. Em: KINGSPAM SOLAR. Kingspan SC 300 Installation and operating instructions, 2010

Figura 45 Display de seleção de linguagem. Em: KINGSPAM SOLAR. Kingspan SC 300 Installation and operating instructions, 2010

Figura 46 Display de configuração de hora e data. Em: KINGSPAM SOLAR. Kingspan SC 300 Installation and operating instructions, 2010

Figura 47 Display de seleção do grupo. Em: KINGSPAM SOLAR. Kingspan SC 300 Installation and operating instructions, 2010

Figura 48 Display de seleção do sistema. Em: KINGSPAM SOLAR. Kingspan SC 300 Installation and operating instructions, 2010

Figura 49 Display de seleção das bombas em operação. Em: KINGSPAM SOLAR. Kingspan SC 300 Installation and operating instructions, 2010

Figura 50 Irradiação que atinge o coletor. Em: SOLAR DISTRICT HEATING. Solar District Heating Guidelines, 2012.