

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE BANCADA EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DA  
IRRADIÂNCIA NA CIRCUNFERÊNCIA DE TUBO

por

Guilherme Schirmer Heberle

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2016.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE BANCADA EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DA  
IRRADIÂNCIA NA CIRCUNFERÊNCIA DE TUBO

por

Guilherme Schirmer Heberle

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 30 de novembro de 2016.

## DEDICATÓRIA

Gostaria de dedicar este trabalho ao Professor Doutor Telmo Roberto Strohaecker, *in memoriam*, coordenador do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF). Um ativo líder, incansável batalhador pelo desenvolvimento institucional, foi uma das forças motrizes do desenvolvimento da área de óleo e gás no sul do país, e um dos responsáveis pela ilustre posição da UFRGS nesse campo.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Martim e Doris, que ajudaram a moldar os meus valores e caráter, e sempre me deram suporte durante toda a minha vida.

Aos meus familiares e amigos que sempre estiveram ao meu lado, nas alegrias e dificuldades.

Aos meus irmãos Déborah e Eduardo que sempre me incentivaram e apoiaram nos meus objetivos.

À minha namorada Fernanda, pelo apoio e compreensão no caminho deste trabalho.

À professora Letícia J. Rodrigues, pela paciência e orientação desafiadora.

Ao departamento de Engenharia Mecânica que contribuiu para o desenvolvimento da minha formação acadêmica.

Aos colegas de trabalho do LAMEF, que além de colegas amigos, sempre estiveram à disposição para orientações.

Ao professor Arno Krenzinger e os colegas do LABSOL, por me auxiliarem no desenvolvimento deste trabalho.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”.  
(Isaac Newton)

HEBERLE, G. S. **Projeto e desenvolvimento de bancada experimental para medição da irradiância na circunferência de tubo**. 2016. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## RESUMO

O presente trabalho trata do desenvolvimento de uma bancada experimental para medição de radiação incidente, irradiância, na circunferência de um tubo, simulando as condições de coletores solares de tubos evacuados e podendo ser ajustada para diferentes configurações de medição para extrapolar as condições de análise. O trabalho consiste das seguintes etapas: calibração dos sensores, projeto e fabricação de dispositivos, montagem e instrumentação, finalizando com os testes e análise dos resultados. Os resultados de radiação incidente no tubo aqui apresentados mostram-se coerentes qualitativamente. Com relação aos ajustes geométricos possíveis da bancada, estes atendem aos requisitos de projeto. Além disso, a análise dos resultados dos testes iniciais de medição da radiação mostra que a medição através de fotodiodo deve ser acompanhada de medição de temperatura no mesmo, ainda mais em um sistema onde não se tem temperatura igual em todos os sensores. Além disso, é necessário atentar para o material dos componentes fabricados por impressão 3D, visto que podem modificar a geometria se não for feito um controle adequado de temperatura do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** bancada experimental para medição de radiação, coletor solar, tubos evacuados, fotodiodos, radiação incidente em tubo a vácuo.

HEBERLE, G. S. **Design and development of experimental bench for measure irradiance in pipe circumference**. 2016. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## ABSTRACT

The present work was the development of an experimental bench for measuring radiation incident on the circumference of a tube, simulating the conditions of solar collectors of evacuated tubes and being able to be adjusted to different measurement configurations to extrapolate the analysis conditions. The work was carried out through the following steps: calibration of the sensors, design and manufacture of devices, assembly and instrumentation, finalizing with the tests and analysis of the results. The radiation values incident on the inner tube could be compared with an analytical model of radiation, in addition to being able to improve numerical models of natural convection in solar collectors of vacuum tubes. The results of initial tests of measurement of the radiation incident on the tube presented here are qualitatively coherent. With respect to the possible geometric adjustments of the bench, it meets the design requirements. In addition, the analysis of the radiation results shows that the measurement through photodiode must be accompanied by temperature measurement in it, even more so in a system where no equal temperature in all sensors. In addition, it is necessary to pay attention to the material of the components manufactured by 3D printing, as they can modify the geometry if an adequate temperature control of the system is not done.

**KEYWORDS:** experimental bench for measuring radiation, solar collector, evacuated tube, photodiode, incident radiation on vacuum tubes.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	3
2.1 Sistemas de aquecimento solar .....	3
2.2 Radiação térmica.....	3
2.3 Ângulos solares – geometria celeste .....	4
2.4 Fotodiodo.....	4
3. METODOLOGIA .....	5
3.1 Instrumentação e calibração .....	5
3.2 Projeto e construção da bancada .....	6
3.2.1 Definições preliminares .....	6
3.2.2 Projeto .....	7
3.2.3 Fabricação .....	8
3.2.4 Montagem e instrumentação .....	9
3.3 Testes preliminares .....	9
3.4 Re-projeto .....	10
3.5 Repetição dos testes .....	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	11
4.1 Análise da Temperatura .....	11
4.2 Análise de Radiação.....	12
5. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS .....	13
6. REFERÊNCIAS.....	14
APÊNDICE 1 - Suporte dos sensores .....	16
APÊNDICE 2 - Suporte dos tubos .....	17
APÊNDICE 3 – Mesa regulável .....	19

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a humanidade evoluiu, em grande parte, devido ao domínio da conversão das diversas fontes da energia. Uma das mais importantes é a reação de combustão, que permitiu aos seres humanos cozinhar alimentos, bem como aquecer e iluminar ambientes. Outra forma de conversão energética está associada aos sistemas de potência a vapor, os quais permitiram à civilização dar um grande salto na industrialização. Logo após vieram os sistemas de conversão de energia térmica em energia elétrica, que é a principal forma de energia utilizada atualmente, destacando-se entre outras pela facilidade de geração e de distribuição. Contudo, ao longo dessa evolução percebeu-se que as formas tradicionais de conversão de energia são causadoras de diversos problemas em termos de saúde e de mudanças climáticas. Por isso, tem-se buscado formas de conversão alternativa às convencionais, ou até mesmo a sua utilização de forma direta.

A consciência coletiva com relação à evolução do planeta tem exigido um mercado com opções de energias renováveis. Desta maneira, ao redor do mundo, vem se observando um aumento crescente nas áreas que envolvem a utilização de energia solar, tanto fotovoltaica quanto térmica. Não obstante, sabemos que, quase todas as formas de energia primárias têm sua origem no Sol, as quais, através de diversos sistemas de conversão de energia, chegam ao consumidor na forma de eletricidade. Por outro lado, também é sabido que ao longo do “caminho” das conversões e da distribuição da energia ocorrem perdas, tanto por efeitos elétricos quanto mecânicos, o que através de uma geração distribuída reduziria grande parte dessas perdas, assim como sua utilização direta na forma de calor.

Segundo SWERA, 2008, o Brasil possui um potencial de produção de energia de 2.853.095 MW a uma eficiência de 10% na conversão da energia solar, se considerada toda sua extensão territorial. De acordo com o Ministério de Minas e Energia, 2014 houve a primeira contratação de energia solar de geração pública centralizada de 890 MW, o que significa 0,03% desse potencial. Nesta mesma década, também foram criadas novas regras para incentivar a geração distribuída de energia elétrica, assim como também foram criados programas para incentivar o uso de sistemas de aquecimento solar de água para residências. No entanto, ainda existem muitas barreiras para o uso desses sistemas, das quais destaca-se as seguintes: alto custo inicial, competição com chuveiros elétricos, falta de capacitação profissional e desinteresse do setor elétrico [Rodrigues e Matajs, 2004].

No que tange à energia solar térmica, o consumidor encontra os seguintes tipos principais de coletores solares: os coletores de placa plana e os coletores de tubos evacuados. Ultimamente, os coletores de tubo evacuado estão mais acessíveis, visto à grande produção destes pela indústria chinesa. Dessa forma, há grande interesse no estudo desse tipo de coletor, para um dimensionamento mais preciso dos sistemas de aquecimento, bem como configurações para otimização de seu desempenho.

Muitos estudos têm sido feitos nesta área de energia solar térmica. Um deles foi o desenvolvimento de um dispositivo para medição da distribuição angular de radiação solar incidente em coletores solares de tubo evacuado [Cabanillas *et al.*, 1995]. Neste caso, foi utilizado um fotodiodo calibrado acoplado em uma haste giratória fixada a um relógio com marcação dos ângulos de uma circunferência. Este dispositivo foi inserido em um tubo de vidro duplo, de um coletor evacuado, para medir a radiação incidente neste sensor, que foi rotacionado manualmente para se ter medidas de 24 posições angulares diferentes a passos de 15° cada. Com esta metodologia, o autor obteve a distribuição circunferencial de radiação no interior do tubo interno.



Nesta mesma linha de pesquisa, Manea, 2012, desenvolveu uma bancada de ensaios de coletores solares de tubos de vidro a vácuo, visando medir seu desempenho, contribuindo para a otimização do dimensionamento de sistemas de aquecimento solar (SAS). Essa avaliação deu-se através da medição da diferença de temperatura de entrada e saída do coletor a uma vazão determinada, em regime permanente. Num segundo momento, Manea, 2016, propôs um modelo analítico de distribuição de radiação na circunferência de um tubo interno a um tubo de vidro externo, onde utilizou propriedades ópticas dos materiais e equações de reflexão, refração e absorção. Pode-se visualizar na Figura 1.1 um esquema do modelo de irradiância no tubo. Em seguida foi realizado um estudo comparativo com os dados de radiação medidos por Cabanillas *et al.*, 1995.

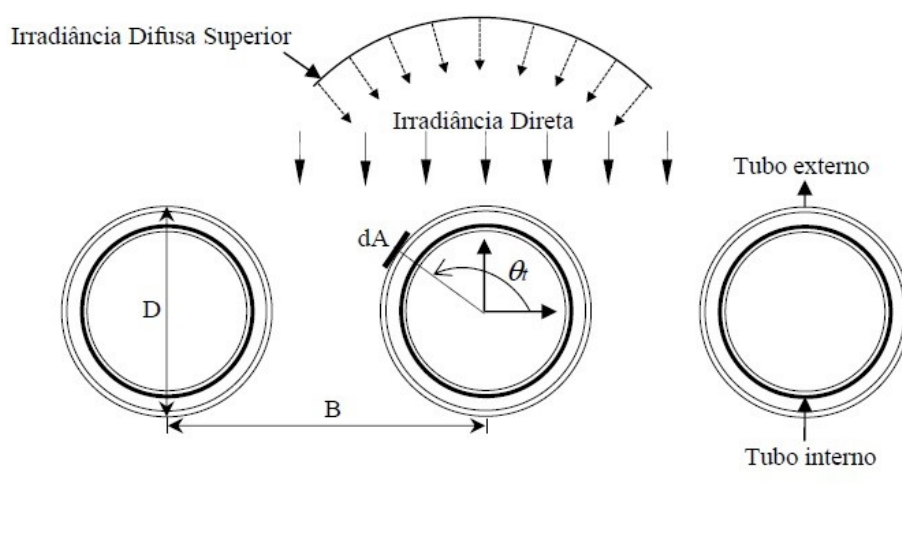


Figura 1.1 – Modelo de irradiância solar no tubo usado em [Manea, 2016]. Fonte: Manea, 2016.

Os resultados comparativos dos perfis de radiação mostraram um comportamento geral próximo. As diferenças encontradas devem-se, em grande parte, à irradiância difusa da superfície posterior, uma vez que esta não é isotrópica e nem a superfície posterior é um plano infinito, considerações feitas no modelo analítico. Não obstante, Manea, 2016, também desenvolveu um modelo numérico de convecção natural de fluido internamente a um coletor de tubos conectado ao reservatório. Um dos parâmetros de análise desse modelo foi a inclinação do coletor, uma vez que influencia diretamente a componente axial da força de empuxo, fator importante para o processo de convecção natural. Nesta situação, as condições de contorno são os dados de distribuição de radiação solar circunferencial.

Desta forma, o projeto e desenvolvimento de uma bancada para medir radiação circunferencial em tubo serviria para eliminar algumas simplificações de Cabanillas *et al.*, 1995, aproximando o sistema à realidade. Aperfeiçoamentos seriam alcançados, como aumentar a precisão dos dados e obter valores para diferentes configurações geométricas. Estes dados, obtidos com desvios menores, poderiam ser usados na comparação com modelos analíticos de radiação. Eles também possibilitariam o aperfeiçoamento das correlações adimensionais geradas por modelos numéricos, como o de Manea, 2016.

Assim, este trabalho tem como objetivos principais projetar e construir uma bancada de medições de radiação, com possibilidade de diferentes ajustes geométricos. O primeiro está relacionado à variação dos ângulos de inclinação dos tubos e da superfície posterior em relação ao zênite, calculado para o dia de medição. O segundo ajuste permite variar a distância entre o

centro dos tubos, quando utilizados mais de um tubo, visando avaliar diferentes configurações de sombreamento. Também é possível mudar a altura entre os centros dos tubos e a superfície posterior a eles. Outro aspecto importante é a opção de se medir, simultaneamente, a radiação incidente em diferentes ângulos ao longo de toda a circunferência do tubo durante uma janela solar pré-determinada de forma contínua.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta Seção são apresentados conceitos importantes associados ao assunto. Maiores detalhes podem ser obtidos em referências clássicas como Incropera *et al.*, 2008 e Duffie e Beckmann, 2013.

### 2.1 Sistemas de aquecimento solar

Os sistemas de aquecimento solar, SAS, têm por objetivo transformar energia radiante oriunda do Sol em energia térmica para um fluido. Esses sistemas devem possuir um coletor solar e um reservatório. Alguns podem utilizar trocadores de calor, no caso do fluido de consumo não ser o mesmo aquecido pelo coletor. Também é possível se ter aquecedores auxiliares, no caso da energia obtida através do coletor não ser suficiente.

Pode se dividir os SAS nos seguintes tipos: sistema passivo, onde a circulação do fluido aquecido dá-se por convecção natural do fluido entre o coletor e o reservatório, e o sistema ativo, onde a circulação do fluido se dá por convecção forçada através de uma bomba hidráulica. Nem sempre é possível se utilizar o sistema passivo, pois é necessário que o reservatório esteja, no mínimo, a uma determinada altura superior aos coletores [Krenzinger *et al.*, 2010].

Os coletores solares podem ser planos ou de tubos a vácuo. Estudos mostram que os coletores solares planos são mais vantajosos em regiões mais quentes, onde se tem menores perdas, em função do gradiente de temperatura ser menor. Já os coletores de tubo a vácuo têm vantagens em aplicações onde se tenha gradientes elevados de temperatura, ou seja, onde as perdas seriam elevadas se fossem utilizados coletores planos [da Rosa, 2012].

### 2.2 Radiação térmica

É a energia emitida por toda a matéria que se encontra a uma temperatura absoluta não-nula. Recebe esta denominação porque é causada e afeta o estado térmico, ou a temperatura, da matéria. Essa energia é transportada por ondas eletromagnéticas, OEM, não necessitando de um meio para propagação. Essa radiação está associada à faixa compreendida entre 0,1 e 100  $\mu\text{m}$  do espectro eletromagnético, compreendendo parte do ultravioleta, todo o visível e o infravermelho [Incropera *et al.*, 2008]. A radiação emitida pelo Sol pode ser aproximada pela radiação emitida por um corpo negro cuja temperatura da superfície é de aproximadamente 5800 K.

A radiação solar possui componentes denominadas direta e difusa. A componente direta provém unicamente do disco solar, chegando ao solo sem ter sofrido mudança de direção, exceto por efeitos de refração na atmosfera. A componente difusa provém de toda a abóboda celeste, excluindo-se o disco solar. Sua direção é modificada devido ao espalhamento na atmosfera. A adição dessas duas componentes define a radiação total, ou global [Krenzinger *et al.*, 2010].

### 2.3 Ângulos solares – geometria celeste

Para determinação da irradiância terrestre máxima em uma superfície faz-se necessário o conhecimento do ângulo de zênite do Sol,  $\theta_z$ , que é calculado através da Equação 2.1. Esses ângulos podem ser visualizados na Figura 2.1.

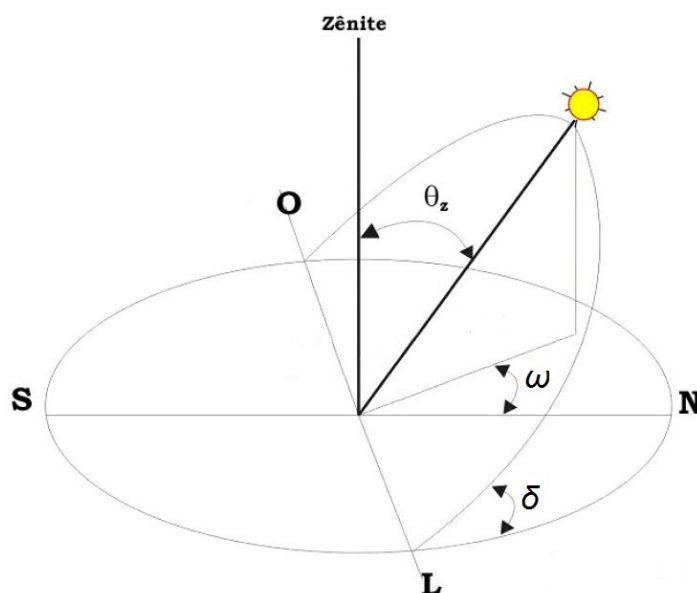


Figura 2.1 – Parâmetros da geometria celeste. Fonte: Adaptado de Krenzinger *et al.*, 2010.

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (2.1)$$

na qual  $\delta$  é a declinação solar,  $\phi$  é a latitude geográfica e o  $\omega$  ângulo horário, todos em graus. A declinação solar,  $\delta$ , é o ângulo formado entre o plano equatorial e a linha que une os centros da Terra e do Sol, que muda continuamente ao longo do ano, variando de 1 a 365. Pode ser obtida através de

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[ \frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (2.2)$$

na qual  $d_n$  é o dia do ano no calendário juliano. O ângulo horário,  $\omega$ , é o ângulo compreendido entre o meridiano do observador e o meridiano do Sol, valendo  $0^\circ$  ao meio-dia solar verdadeiro e variando  $15^\circ$  por hora [Krenzinger *et al.*, 2010].

### 2.4 Fotodiodo

São sensores fotovoltaicos, compostos por um material semicondutor, que podem ser utilizados para a medida da irradiação solar. Na incidência de radiação, surge um contínuo movimento dos elétrons e das lacunas desse semicondutor, ocasionando o surgimento de uma corrente elétrica. Esses sensores possuem como vantagem o baixo custo e o tempo de resposta de  $10 \mu\text{s}$ , aproximadamente, o qual é considerado muito rápido. Porém, apresentam algumas desvantagens, como resposta espectral seletiva, por exemplo. Para um sensor de silício essa resposta é pequena para comprimentos de onda inferiores a  $0,4 \mu\text{m}$  e superiores a  $1,1 \mu\text{m}$ . Sua resposta máxima está próxima a comprimentos da ordem de  $0,95 \mu\text{m}$ .

### 3. METODOLOGIA

Nesta Seção são tratados os aspectos específicos associados à metodologia utilizada. Primeiramente apresenta-se a calibração dos fotodiodos. Após, são discutidas as questões geométricas, envolvendo dimensões, projeto fabricação e montagem do sistema. Por último, são feitos alguns redimensionamentos em função de testes preliminares.

#### 3.1 Instrumentação e calibração

Para as medidas de radiação foram utilizados 24 fotodiodos da marca Vishay modelo BPW34, soldados segundo as especificações do *datasheet* do sensor. A conexão entre os sensores e o sistema de aquisição deu-se através de três cabos de oito vias com aproximadamente 4,5 m de comprimento cada. O sistema de aquisição utilizado durante o trabalho foi o Agilent 34972A com duas placas de vinte canais cada.

A calibração dos sensores foi feita por comparação com um piranômetro padrão. Todos os sensores foram dispostos em uma placa de circuito impresso, com objetivo de ficarem no mesmo plano do piranômetro. A duração foi de aproximadamente 30 min, com uma frequência de leitura de dados de 0,2 Hz, totalizado 360 medidas para cada fotodiodo. A determinação das curvas de calibração foi feita utilizando regressão linear simples. Os resultados sumarizados da calibração podem ser visualizados abaixo, Tabela 3.1, sendo *CC* o coeficiente de correlação e  $\alpha$  e  $\beta$  os coeficientes da equação de operação

$$I = \alpha \cdot U \cdot 10^3 + \beta \quad (2.3)$$

na qual *I* é o valor calculado da irradiância, em W/m<sup>2</sup>, e *U* a diferença de potencial medida no fotodiodo, em mV.

Tabela 3.1. Coeficientes da equação de operação dos fotodiodos, obtidos na calibração.

<b>Fotodiodo</b>	<b>CC</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><i>B</i></b>	<b>Fotodiodo</b>	<b>CC</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\beta</math></b>
<b>1</b>	0,9910	60,16	-14,77	<b>13</b>	0,9867	56,91	-6,50
<b>2</b>	0,9908	57,47	-7,20	<b>14</b>	0,9870	63,28	-9,75
<b>3</b>	0,9911	58,77	-10,49	<b>15</b>	0,9872	62,66	-9,59
<b>4</b>	0,9914	63,67	-14,11	<b>16</b>	0,9873	58,00	-11,39
<b>5</b>	0,9916	61,90	-14,32	<b>17</b>	0,9875	59,65	-8,26
<b>6</b>	0,9917	59,22	-15,24	<b>18</b>	0,9877	66,34	-3,44
<b>7</b>	0,9919	59,07	-12,85	<b>19</b>	0,9879	64,76	-14,40
<b>8</b>	0,9920	60,20	-12,89	<b>20</b>	0,9882	63,30	-12,93
<b>9</b>	0,9922	62,08	-17,51	<b>21</b>	0,9881	62,47	-6,75
<b>10</b>	0,9923	62,78	-18,15	<b>22</b>	0,9884	60,68	1,37
<b>11</b>	0,9923	61,39	-3,68	<b>23</b>	0,9886	60,62	5,58
<b>12</b>	0,9924	58,19	-9,42	<b>24</b>	0,9888	63,37	-5,60

A Figura 3.1 apresenta os dados de calibração de um dos fotodiodos, assim como a sua equação gerada por regressão linear simples. No eixo das abscissas temos os valores de tensão medidos no fotodiodo, em mV, e no eixo das ordenadas os valores de irradiância obtidos através do piranômetro de referência, em W/m<sup>2</sup>.

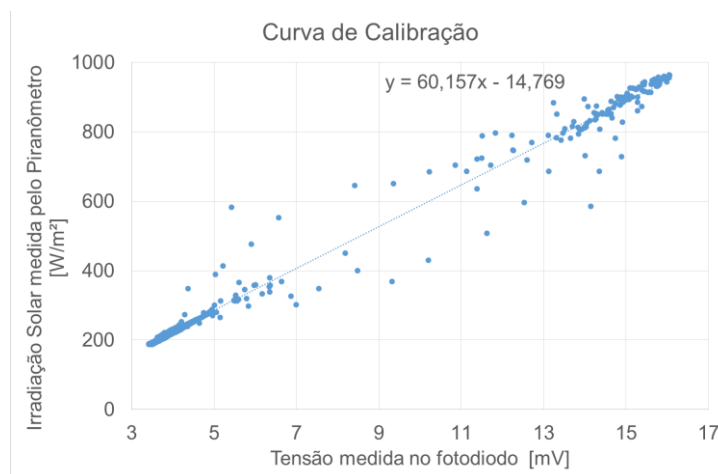


Figura 3.1 – Dados de calibração de um dos fotodiodos.

### 3.2 Projeto e construção da bancada

Esta subseção encontra-se dividida em quatro tópicos, que são definições preliminares, projeto, fabricação e montagem.

#### 3.2.1 Definições preliminares

##### 3.2.1.1 Sensores

A escolha baseou-se no trabalho de Cabanillas *et al*, 1995, que desenvolveu uma bancada de medição de radiação com objetivo semelhante ao deste trabalho, cujo sensor utilizado foi um fotodiodo. Neste caso, o fotodiodo em questão trata-se do modelo BPW34, cujas dimensões, em milímetros, são apresentadas na Figura 3.2.

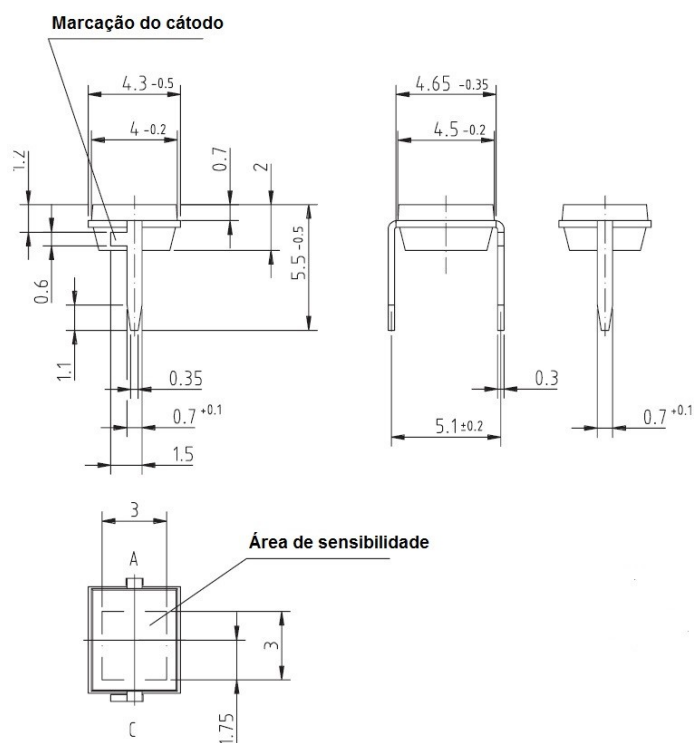


Figura 3.2 – Dimensões do fotodiodo. Fonte: Vishay, 2016.

### 3.2.1.2 Dimensões dos tubos

Os parâmetros geométricos do sistema basearam-se na geometria de um tubo a vácuo comercial com as dimensões mostradas abaixo, Figura 3.3. O tubo de vidro utilizado tem as mesmas dimensões do tubo comercial, exceto pelo comprimento que foi reduzido para 1 metro, com o objetivo de se reduzir o tamanho total da bancada, facilitar o dimensionamento da mesma e para se desprezar efeitos de borda, que poderiam interferir nas medidas de radiação. Com relação ao tubo interno, fixou-se o seu diâmetro externo em 47 mm e o seu comprimento igual ao tubo de vidro.

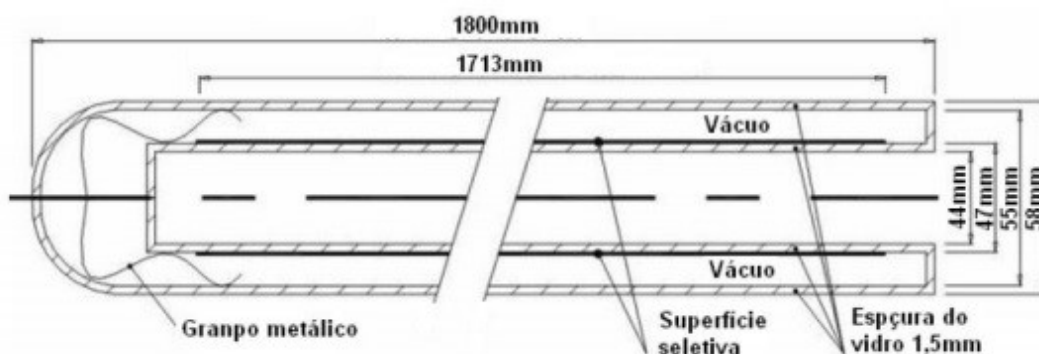


Figura 3.3 – Dimensões de tubo comercial de coletor solar evacuado Fonte: Manea, 2012.

## 3.2.2 Projeto

### 3.2.2.1 Suporte dos sensores

O suporte dos sensores foi projetado conforme Figura A.1.1 do Apêndice 1. Esta peça foi pensada inicialmente como seção curta de tubo com rasgos para a entrada de cada sensor cabeado. As faces de apoio de cada sensor foram projetadas para serem paralelas à superfície do tubo no respectivo ângulo do sensor. Obtendo assim 24 superfícies com inclinações de 15° entre si, ao longo de toda a circunferência.

### 3.2.2.2 Suporte dos tubos

Os suportes para os tubos foram dimensionados com o intuito de possibilitar o ajuste da distância entre os centros dos tubos de 7 a 11 cm, bem como regular a distância entre o centro dos tubos e a superfície posterior da bancada numa faixa de 5 a 40 cm de altura. As Figuras A.2.1 e A.2.2 do Apêndice 2 mostram os suportes, bem como as possibilidades de configurações de montagem.

### 3.2.2.3 Mesa regulável

A mesa regulável foi projetada com o objetivo de ajustar a declividade solar em função do dia do ano. No caso de Porto Alegre de 6° a 57° seria o suficiente, mas o limite máximo de regulagem seria de 90°, ou seja, é possível se fazer medições com os tubos posicionados verticalmente. Nesta mesa foram fixados cabos de aço para regulagem do ângulo, bem como sua fixação. A Figura A.3.1 do Apêndice 3 mostra a mesa numa configuração de 60° em relação ao plano vertical.

### 3.2.2.4 Conexões para alinhamento dos sensores.

Foi projetado um conjunto de componentes intermediários ao suporte dos sensores e suporte dos tubos, visando ao alinhamento correto dos sensores com relação ao ângulo de zênite ao meio-dia. Dessa forma, deixando um dos sensores perpendicular ao zênite do meio-dia solar, os outros sensores estarão defasados entre si  $15^\circ$  conforme o ângulo do suporte. Foi preciso fabricar o tubo em duas partes em função das limitações de fabricação da impressora. A Figura 3.4 apresenta uma vista explodida de montagem das conexões.

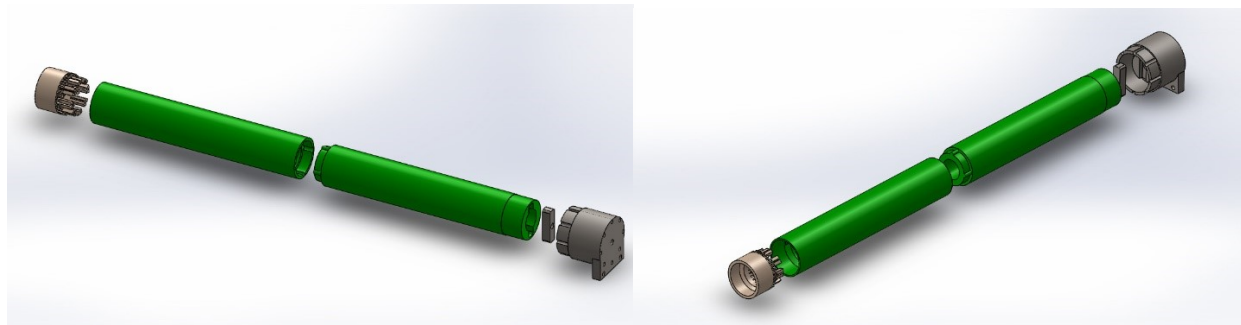


Figura 3.4 – Vista explodida da montagem das conexões.

### 3.2.3 Fabricação

Para a fabricação das peças 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 e 9 da Figura 3.4, foram utilizados os filamentos PLA 1,75 mm nas peças fabricadas pelo processo de impressão 3D. A peça 4 da Figura 3.5 foi feita através do corte de uma chapa com  $\frac{1}{4}$ " de espessura, pelo processo de corte por jato d'água. A peça 10 foi feita utilizando um tubo comercial em PPR com diâmetro nominal de 50 mm, o qual foi usinado em torno CNC para obter as dimensões de projeto. A mesa regulável foi fabricada em uma chapa de compensado com 20 mm de espessura sobre a qual foi colado um espelho com 1,5 m por 1 m.

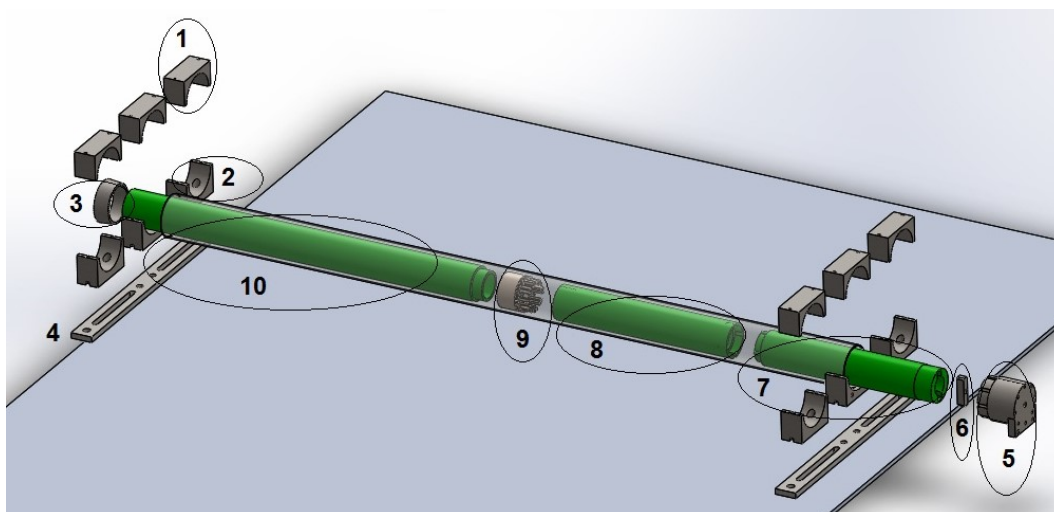


Figura 3.5 - Vista explodida da montagem do sistema. Suporte superior de tubo (1), Suporte inferior de tubo (2), Centralizador de tubos(3), Base dos suportes (4), Fechamento de tubos (5), Conexão fechamento-tubo (6), tubo-fechamento (7), tubo-suporte sensores (8), suporte sensores (9), tubo PPR (10).

### 3.2.4 Montagem e instrumentação

A montagem de toda a bancada experimental foi dividida em duas etapas, a de instalação e ajuste da mesa regulável e a de instrumentação e acoplamento de todos os suportes bem como seus posicionamentos.

#### 3.2.4.1 Mesa regulável

A mesa regulável foi instalada em um parapeito do terraço do LABSOL, foi necessário o uso de uma empilhadeira para elevá-la até o terraço. Após a fixação da mesa no parapeito, esta foi coberta com uma lona com o intuito de preservar as suas condições físicas em função de umidade e chuvas, bem como proteger os dispositivos da degradação da radiação solar.

#### 3.2.4.2 Sensores, suportes e conexões

A montagem do sistema se fez primeiramente introduzindo todos os cabos e sensores pelo tubo em PPR conectado este ao suporte dos sensores, e com o tubo de vidro inserido externamente ao anterior. Os fotodiodos foram inseridos e colados individualmente no suporte. A outra metade do sistema foi montada separadamente, e em seguida unida ao suporte dos sensores. Montados os tubos estes foram fixados na chapa de apoio regulável, que foi previamente regulada para uma altura de 7 cm em relação ao centro do tubo. Esta montagem pode ser vista na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Foto da bancada de medição montada e regulada.

Além desse sistema, foi fixado à superfície da mesa um piranômetro de referência. Também foi montado em uma mesa ao lado, outro piranômetro com um anel de sombra para medir a radiação solar difusa.

### 3.3 Testes preliminares

Os primeiros testes mostraram-se promissores com relação ao posicionamento da mesa em função da declividade solar para o dia de teste e à concentricidade dos tubos. Conseguiu-se um ajuste da inclinação da mesa com aproximação de uma casa decimal. Além disso, fez-se uma análise visual da concentricidade dos tubos, mostrando-se a montagem adequada. No



entanto, no dia seguinte, quando verificada as condições da bancada para se fazer as medidas durante a janela solar planejada, foram percebidos alguns defeitos. As peças fabricadas em PLA estavam distorcidas, portanto os sensores estavam fora das posições de montagem. Além disso, os tubos se contraíram, o que fez com que o suporte dos sensores se deslocasse radialmente em relação ao tubo de vidro, gerando assim uma excentricidade.

Assim, foi feita uma análise causal dos defeitos, verificando-se que o aquecimento do sistema elevou a temperatura dos tubos internos acima de 65°, temperatura de transição vítrea do PLA. Ademais, a falta de um sistema para manter os tubos sempre comprimidos um em relação ao outro ocasiona folgas.

### 3.4 Re-projeto

Com o intuito de sanar os problemas que alteraram a geometria do sistema de medição, foram feitos alguns ajustes no projeto. No que cabe à rigidez dos tubos, utilizou-se uma barra roscada atravessando os mesmos, os suportes dos sensores, e os fechamentos dos suportes dos tubos. Desta forma, foram comprimidos os tubos através do aperto de uma porca com uma chapa numa das extremidades e na outra extremidade com outra porca e o fechamento de um suporte de tubo. A montagem desse sistema pode ser vista na Figura 3.7.

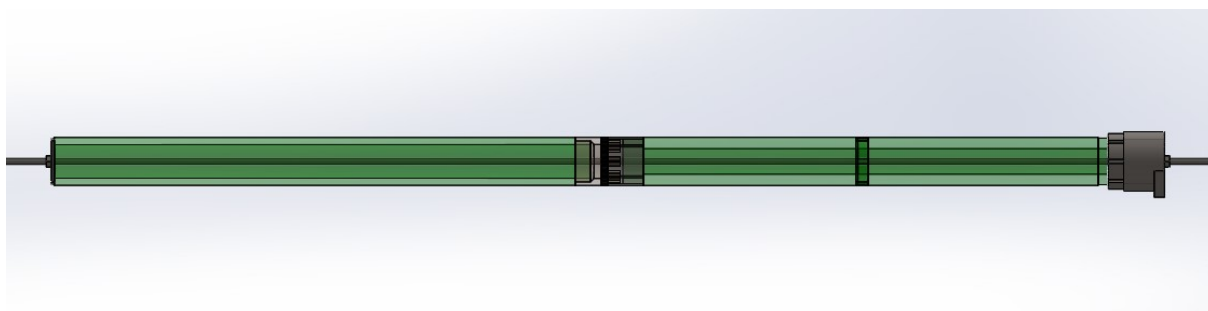


Figura 3.7 – Sistema de aperto de tubos.

Nessa mesma linha, foi desenvolvida uma peça de aço para conectar o tubo e o suporte dos sensores. Buscando, dessa forma, aumentar a rigidez do centro do sistema, para reduzir uma possível excentricidade. Na Figura 3.8 é mostrada uma vista explodida em corte desse novo acoplamento.

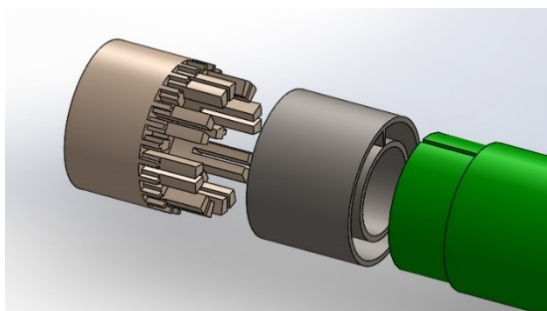


Figura 3.8 – Acoplamento feito com peça intermediária em aço carbono.

No que tange ao aquecimento das peças devido à falta de renovação do ar preso entre os tubos, foi proposto um sistema para a retirada desse ar. Para isso, foram necessárias algumas modificações nos dispositivos de fechamento acoplados nos suportes dos tubos. Foram adicionadas furações com a intenção acoplar mangueiras de ar comprimido numa das

extremidades, e na outra, furações para saída do ar. Além dessas alterações, foi instalado um compressor de pequeno porte. Montado o sistema para escoamento forçado de ar pelo tubo, ainda se inseriu uma serpentina de cobre imersa numa caixa de isopor com gelo para resfriar o ar antes de entrar entre os tubos. Com a intenção de avaliar quantitativamente a temperatura interna do sistema, foram colados alguns termopares tipo T próximos ao suporte dos sensores, além de deixar um deles apenas inserido entre os tubos para medir a evolução temporal da temperatura do ar entre os tubos.

### 3.5 Repetição dos testes

Os testes foram repetidos no dia 4 de novembro com condições climáticas de céu limpo, sem nuvens. Houve ainda uma tendência ao aumento da temperatura do sistema, quando exposto à radiação por longo período. À vista disso, optou-se por fazer as medidas de radiação em intervalos curtos próximos às horas solares cheias, cobrindo todo o sistema após os intervalos de medição. Deste modo foram evitadas alterações geométricas do sistema.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos itens a seguir serão expostos os resultados obtidos das medições de radiação e evolução da temperatura dos termopares, bem como sua análise.

### 4.1 Análise da temperatura

Através das medições de temperatura foi gerada a Figura 4.1. Esta mostra a variação de temperatura do fluxo de ar entre os tubos e ainda a evolução da temperatura na superfície da conexão metálica posicionada próxima ao suporte dos sensores. Pode-se verificar que a temperatura do ar aumenta rapidamente quando o sistema é descoberto para as medições de radiação, atingindo picos de 51° C.

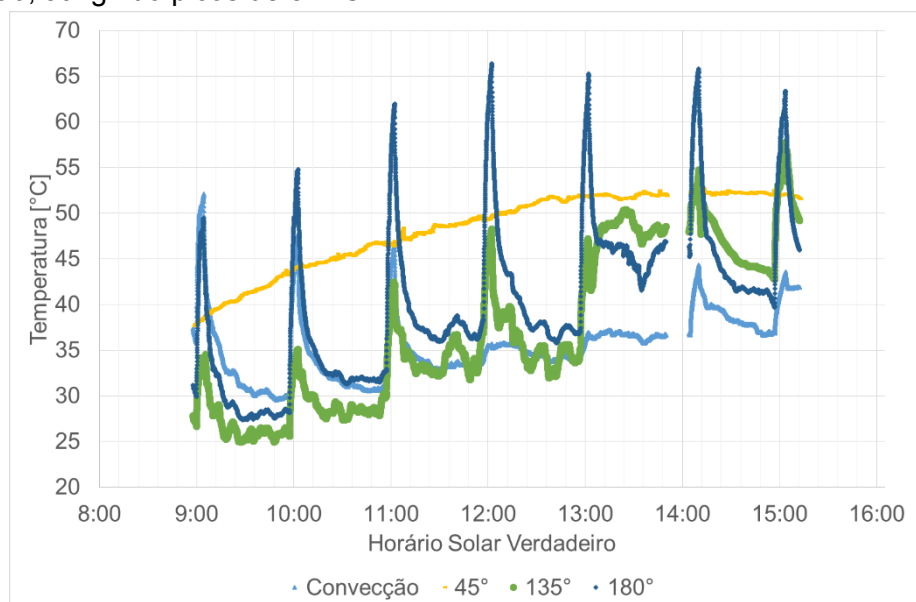


Figura 4.1 – Evolução temporal da temperatura.

Percebe-se, também, que a leitura do termopar a 45°, um comportamento de evolução gradual da temperatura, sem picos. Os picos de temperatura dos outros sensores podem estar associados à falta de adesão do termopar a parede do tubo, fazendo com que seja medida a

temperatura de ar enclausurado na fixação. Esses picos estão coerentes com os picos de temperatura do ar em convecção.

#### 4.2 Análise de Radiação

Afim de se obter a relação de radiação dos sensores, todos os dados foram normalizados em função do máximo valor medido. Para minimizar a influência causada pelas variações de temperatura, em cada sensor ao longo do tempo, foi utilizada a média dos valores medidos para cada sensor nos primeiros 10 segundos. Através deste procedimento se evita grandes variações de temperatura em cada sensor. Uma vez que, antes das medições o tubo permanece por um longo período coberto. Nas Figura 4.2 e 4.3 é possível visualizar esses dados normalizados, e verificar a distribuição de radiação normalizada nas horas cheias da janela solar.

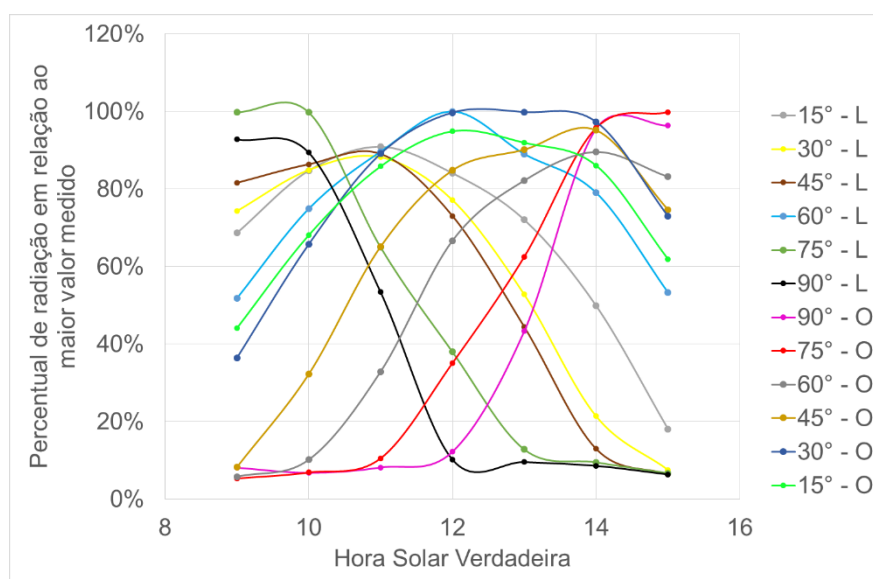


Figura 4.2 - Radiação incidente normalizada medida na parte superior do tubo.

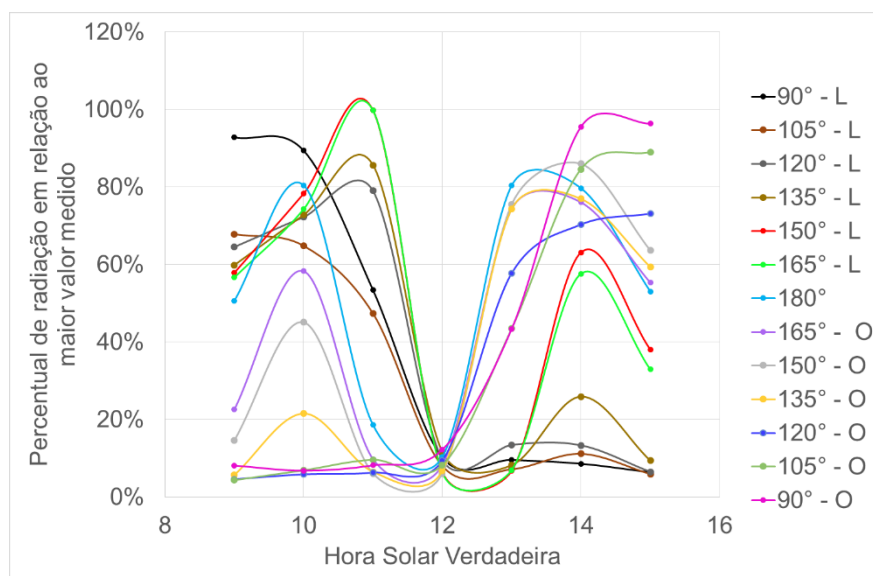


Figura 4.3 - Radiação incidente normalizada medida na parte inferior do tubo.

Os perfis de radiação são apresentados na Figura 4.4, onde mostra a distribuição de radiação incidente no tubo em função do ângulo de medição para cada hora cheia dentro da janela solar. Os resultados são coerentes, visto que há uma região sombreada que não recebe nem radiação solar direta nem direta refletida pela superfície posterior.

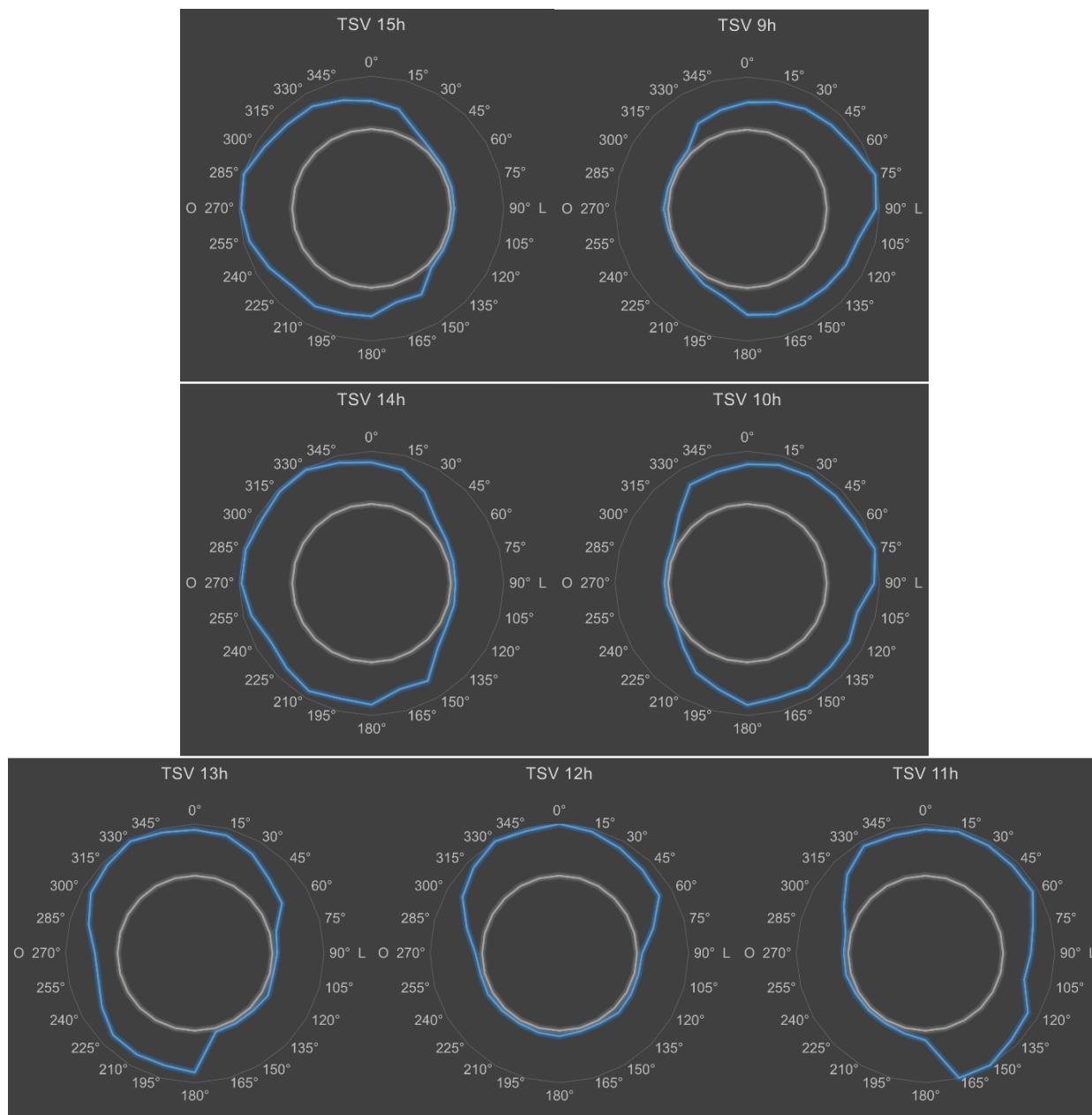


Figura 4.4 - Perfis de radiação incidente normalizado nas horas cheias da janela solar

## 5. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

O presente trabalho tinha como objetivos principais o projeto e a construção de uma bancada experimental para a avaliação radiação solar incidente em tubos cilíndricos, semelhantes aos coletores solares de tubo evacuado. A bancada deveria permitir variações de inclinação, sua e dos tubos, bem como a alterações de outros parâmetros geométricos, como

espaçamento entre tubos, altura entre a superfície posterior e o tubo, etc. Além disso, deveria propiciar a medida instantânea da radiação solar incidente em toda a superfície do tubo, um dos grandes diferenciais quando comparada a trabalhos anteriores.

O objetivo proposto foi alcançado, uma vez que a fabricação e a montagem da bancada proposta atendem às condições de ajuste buscadas em relação ao posicionamento dos tubos e variação dos ângulos. Entretanto teve-se maior dificuldade no ajuste dos tubos concêntricos, devido à grande amplitude térmica do sistema desde a sua montagem até o momento de máxima incidência de radiação, sendo necessária a adição de sistema para melhorar a conectividade dos tubos. Além disso, adicionou-se um sistema para expulsão do ar confinado entre os tubos.

O diferencial desse sistema foi o desenvolvimento do suporte para os sensores, que permitiu um posicionamento correto dos fotodiodos. Além disso os resultados de medição mostram uma comparação instantânea de todos os sensores na circunferência, ou seja, por mais que sejam alteradas as condições de radiação em função das atenuações atmosféricas o sistema mostra a relação entre eles.

Outro aspecto interessante está relacionado ao perfil de distribuição da radiação incidente. Pode-se observar principalmente nas primeiras e últimas horas solares da janela medida, que os máximos valores medidos não se encontram nos ângulos onde se teria radiação incidente direta máxima. E os sensores localizados nas regiões sombreadas recebem apenas radiação difusa.

Finalmente, a bancada construída alcançou várias metas de projeto, principalmente a possibilidade de se medir a radiação solar instantaneamente ao longo de toda a circunferência do tubo. Além disso, o arranjo é de fácil utilização, desmontável e permite ajustes posteriores.

Nesse sentido, sugerem-se as seguintes metas para trabalhos futuros:

- A utilização de diferentes superfícies posteriores (tanto difusas, como especulares, e com geometrias não planas;
- A possibilidade de medição da temperatura individual de cada fotodiodo, com vistas à correção dos valores medidos e da determinação da radiação medida, quantitativamente;
- O desenvolvimento de um novo sistema de refrigeração, afim de controlar possíveis dilatações, reduzindo esforços e mantendo estável a relação geométrica entre os tubos. Bem como permitir o sistema a longos períodos de medição;
- O projeto de uma bancada de calibração de múltiplos fotodiodos com aquisição de temperatura individual para cada um, assim como sistema que permita variar a temperatura para aumentar a faixa de utilização destes.

## 6. REFERÊNCIAS

Cabanillas, R. E., Estrada, C. A., Avila, F. "A device for measuring the angular distribution of incident radiation on tubular solar collectors", **Renewable Energy**, Vol. 6, No. 7, pp. 843-847, 1995.

da Rosa, F. N., "Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil". Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

Duffie, J. A., Beckman, W. A., "Solar Engineering of Thermal Processes", Wiley, 4th Edition, 2013.

Incropera, F. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., David, P., **“Fundamentos de transferência de calor e de massa”**, John Wiley & Sons, Sexta Edição, 2008.

Manea, T. F. **“Desenvolvimento de uma bancada para ensaios de coletores solares de tubos de vidro a vácuo”**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

Manea, T. F. **“Avaliação numérica experimental da convecção natural em coletor solar de tubos evacuados”**, Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

Ministério de Minas e Energia, República Federativa do Brasil. “Energia solar fotovoltaica cresceu quase 30% no mundo em 2014”, disponível em [http://www.mme.gov.br/web/quest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/energia-solar-fotovoltaica-cresceu-quase-30-no-mundo-em-2014](http://www.mme.gov.br/web/quest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/energia-solar-fotovoltaica-cresceu-quase-30-no-mundo-em-2014). Acesso em: 08/11/2016.

Rodrigues, D. e Matajs, R., “Um Banho de Sol para o Brasil - O que os Aquecedores Solares pode fazer pelo Meio Ambiente e a Sociedade”, Vitae Civilis Instituto para o Desenvolvimento, 2004.

Vishay, “Vishay Semiconductors”, disponível em <http://www.vishay.com>. Acessado em 20/03/2010.

SWERA, “Solar and Wind Energy Resource Assesment”, disponível em [en.openei.org](http://en.openei.org). . Acessado em 08/11/2016.

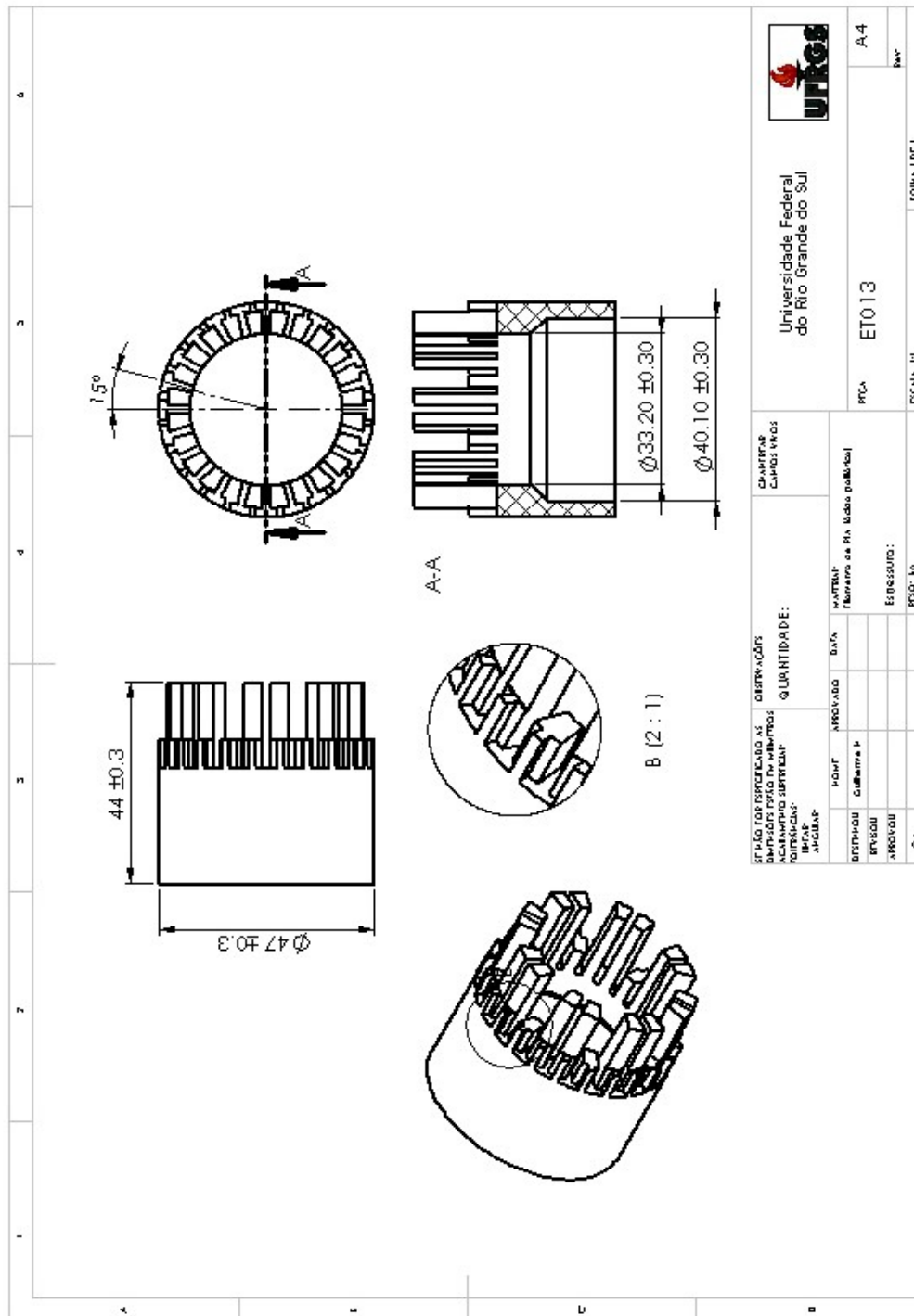


Figura A.1.1 – Desenho de fabricação do suporte construído para os sensores.

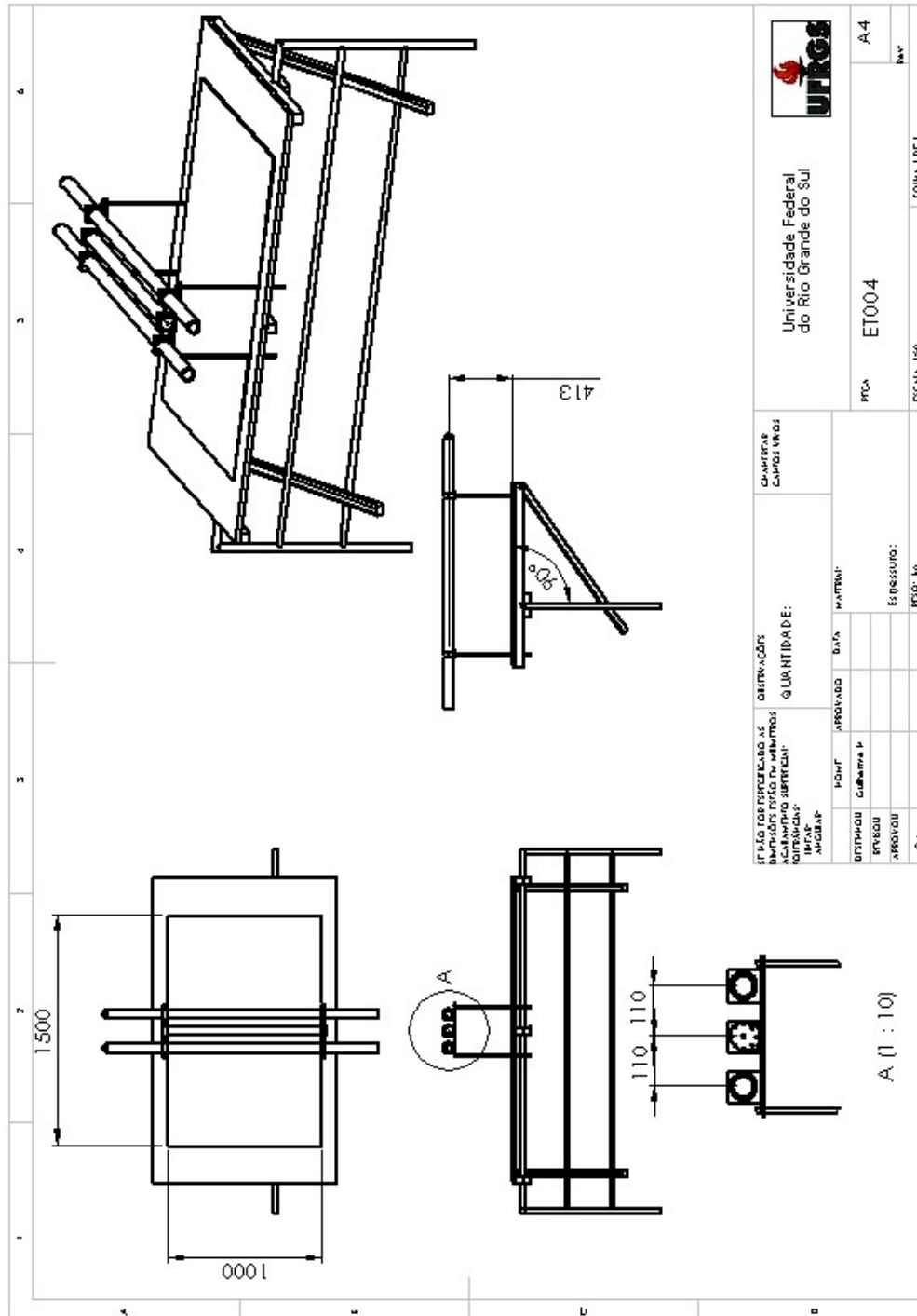


Figura A.2.1 – Desenho esquemático das configurações máximas dos suportes.



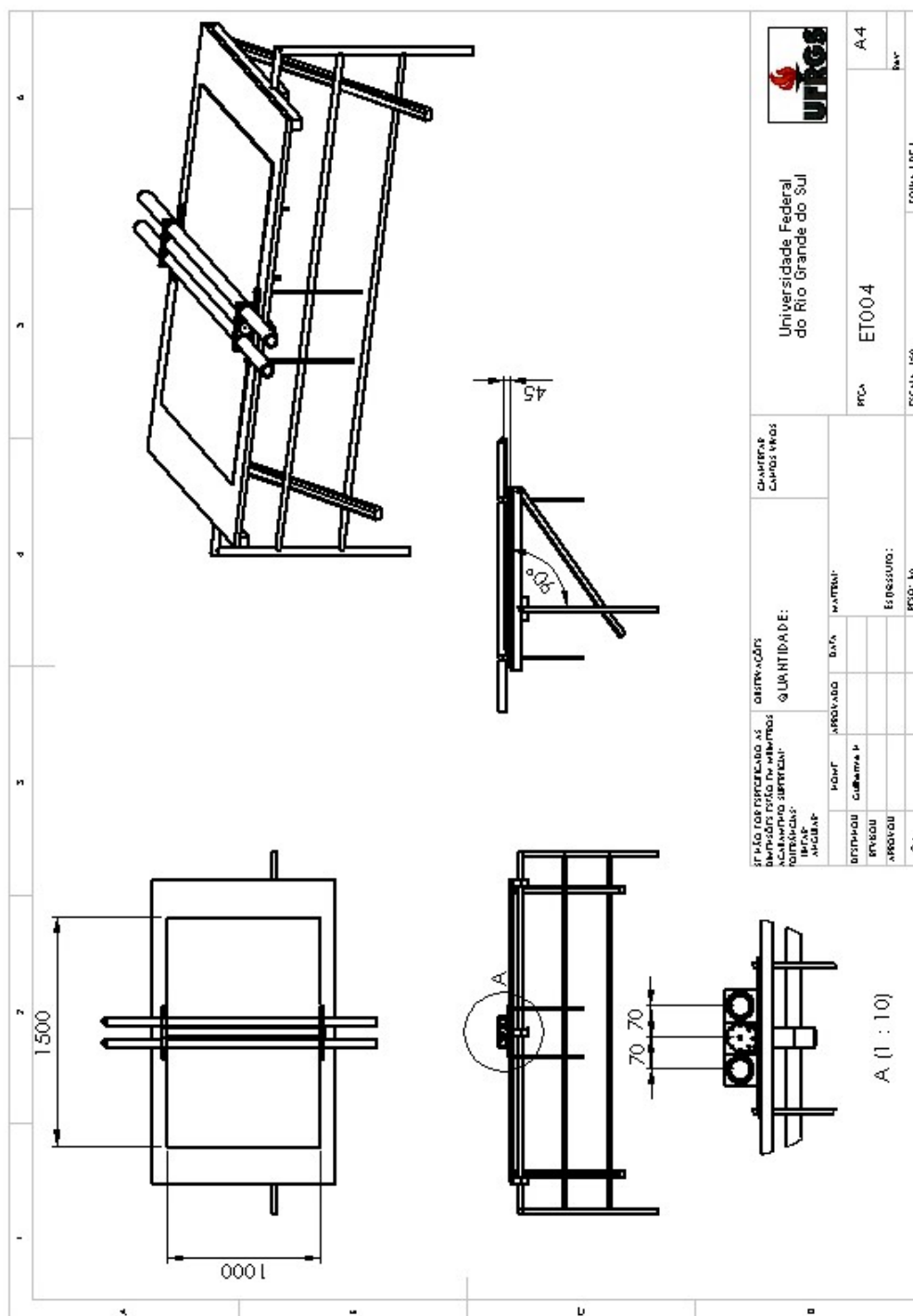


Figura A.2.2 - Desenho esquemático das configurações mínimas dos suportes.

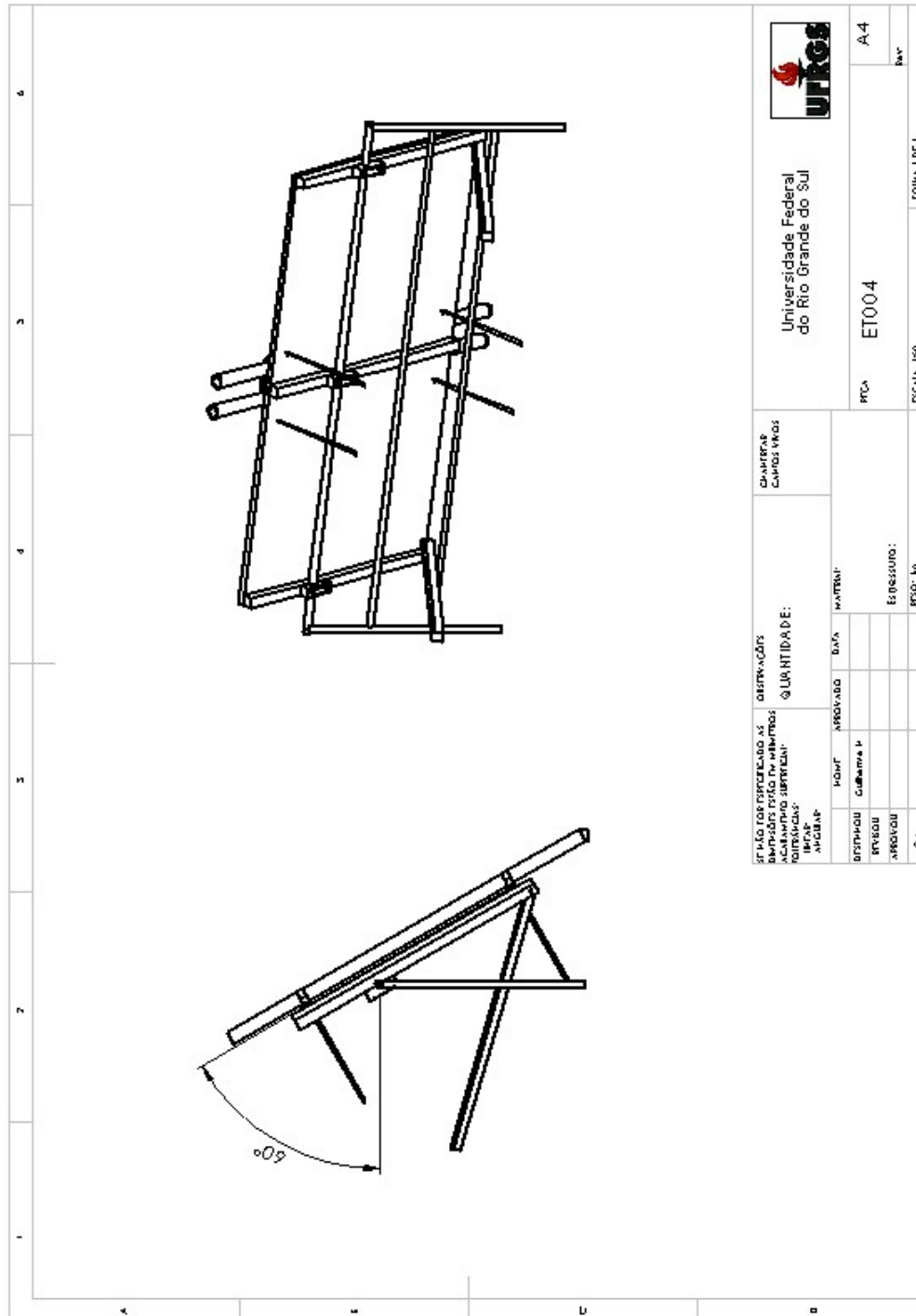


Figura A.3.1 – Desenho esquemático da mesa regulada para um ângulo de 60°.