# ESTUDO E MONTAGEM DE TÚNEL PARA SIMULADOR SOLAR

Camilo Ospina Hincapie – camiloospinahincapie@gmail.com Luiz Antonio Piccoli Junior – luiz.piccoli@ufrgs.br Fabiano Perin Gasparin – gasparin.fabiano@gmail.com Arno Krenzinger – arno@mecanica.ufrgs.br Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

**Resumo.** O aumento da demanda por energias renováveis torna cada vez mais importante a pesquisa na área de energia solar. Tendo isso em vista, o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul adquiriu um simulador solar com a finalidade de estudar o comportamento de módulos fotovoltaicos e também para melhorar a capacidade de realizar ensaios de certificação de módulos. Esses ensaios são exigidos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia para que esses equipamentos possam ser comercializados no país. O objetivo desse trabalho é estudar e descrever a instalação do túnel para abrigar o simulador solar. O próprio fabricante do equipamento fornece um túnel, contudo, optou-se por desenvolver o túnel no laboratório, através do estudo das características necessárias para sua construção. O túnel precisa ter colimadores e dimensões de acordo com as especificadas pelo fabricante do simulador solar. Igualmente, precisa ser revestido internamente por superfície de alta absortividade para minimizar as reflexões da radiação nas paredes. Para isso, foi realizado um experimento comparando a refletividade espectral de diferentes materiais. O túnel também precisa possuir climatização de maneira que o módulo esteja a 25 °C para realizar o teste de conformidade, assim a carga térmica do túnel foi calculada com o software de simulação de desempenho termo-energético EnergyPlus. Os resultados mostraram que o melhor material para o revestimento interno das paredes foi uma manta de espuma de borracha preta lixada dentre outros sete materiais verificados: tecido preto, MDF preto, adesivo automotivo preto fosco e comum, tinta preta fosca, manta de espuma de borracha preta sem lixar e tapete de borracha. A carga de ar condicionado foi calculada para diferentes valores de trocas de ar do túnel, sendo que para quatro trocas de ar por hora a carga térmica resultou em 5893 btu/h. Os materiais utilizados e a montagem do túnel também são descritos no trabalho.

Palavras-chave: Energia Solar, Módulos Fotovoltaicos, Simulador Solar, Refletividade.

# 1. INTRODUÇÃO

A energia solar é uma fonte inesgotável e presente em todo o planeta. O seu estudo é muito importante para o desenvolvimento das sociedades, visto que é uma energia limpa, abundante e renovável com uso e importância crescente para a maioria dos países. A crescente demanda por energias renováveis ocasionou um aumento na fabricação de células solares e instalações fotovoltaicas. Segundo o relatório elaborado pelo REN21 (2013) a produção de energia fotovoltaica tem apresentado um aumento exponencial entre os anos 2001 e 2012, dobrando a cada dois anos aproximadamente. A potência total fotovoltaica conectada à rede no mundo em 2007 era igual a 7,6 GWp, 16 GWp em 2008, 23 GWp em 2009, 40 GWp em 2010 e 70 GWp em 2011.

Conforme apresentado pela EPIA (2013), no ano de 2012 a produção de energia fotovoltaica gerada a nível mundial foi da ordem de 110000 milhões de kWh de eletricidade o que representa aproximadamente 0,5 % da demanda mundial de eletricidade.

Os módulos fotovoltaicos são os responsáveis pela geração da eletricidade a partir da radiação solar e a determinação dos seus parâmetros é feita através da medição de sua curva característica, isto é, a curva da corrente versus tensão (*I-V*). O relatório apresentado por Taylor et al., 2010 apresenta comparações, análise de incertezas e lista as normas europeias para ensaios de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos, contendo informações que contemplam diversos aspectos da caracterização de módulos fotovoltaicos.

Os parâmetros mais importantes extraídos da curva característica são:

- Potência máxima  $(P_m)$ ;
- Tensão da máxima potência (V<sub>mp</sub>);
- Corrente de máxima potência (*I<sub>mp</sub>*);
- Corrente de curto-circuito (*I*<sub>sc</sub>);
- Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ );
- Fator de forma da curva (FF).

A determinação das curvas características dos módulos deve ser realizada nas condições-padrão de teste, ou no caso em que não for possível realizar o ensaio em tais condições, as curvas devem ser corrigidas de acordo com a norma IEC 60891(2009):

- Irradiância solar de 1000 W/m<sup>2</sup>;
- Temperatura de célula de 25 °C;
- Distribuição espectral padronizada AM1,5 para a radiação incidente (massa de ar 1,5).

Atualmente, o LABSOL - UFRGS, situado em Porto Alegre - RS, utiliza um gabinete climatizado para a realização dos ensaios de módulos fotovoltaicos. O gabinete possui ar condicionado e isolamento térmico para manter a temperatura do módulo o mais próximo possível de 25 °C e uma abertura por onde o módulo é exposto à radiação natural do Sol. A desvantagem deste sistema é que para realizar os testes o céu necessariamente deve estar sem nuvens ou com poucas nuvens, limitando a realização dos ensaios de acordo com as condições atmosféricas.

O simulador solar possibilita a realização dos testes de conformidade para módulos fotovoltaicos exigidos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e também abre oportunidades para diversas pesquisas na área de energia solar. Com o novo equipamento os ensaios podem ser realizados em dias nublados ou mesmo à noite além de possibilitar um melhor controle da temperatura do módulo e da célula de referência durante o ensaio.

#### 2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é descrever o projeto e a instalação do túnel para o simulador solar adquirido pelo LABSOL. O simulador solar foi adquirido com recursos da FINEP no seu programa CT-INFRA aprovado com outras demandas para melhorar a infraestrutura de pesquisa na UFRGS. Devido à limitação do financiamento recebido, optouse por não adquirir o túnel do próprio fabricante do simulador, gerando então a oportunidade de associar a economia de recursos com o estudo das características necessárias para a montagem de um túnel que mantivesse os requisitos para a ótima qualidade esperada para os experimentos. Os materiais e a construção do túnel foram financiados através de projeto aprovado no CNPq dentro do Edital 05/2010.

O túnel deve ser internamente revestido por superfície com alta absortividade e possuir colimadores conforme geometria descrita pelo fabricante. A Fig.1, com dimensões em mm, mostra as características geométricas dos colimadores que devem ser seguidas para um túnel de 5,5 m de comprimento compatível com o modelo de simulador solar adquirido. A Fig. 1 também mostra o posicionamento da luminária do equipamento simulador e o posicionamento do módulo fotovoltaico. Também é objetivo desse trabalho apresentar o cálculo do dimensionamento do condicionador de ar do túnel, visto que a temperatura no interior deve ser mantida em 25ºpara realização das medidas nas condições-padrão de teste.



Figura 1– Dimensões (em mm) especificadas pelo fabricante do simulador solar para o túnel e colimadores com indicação da posição do módulo fotovoltaico e da lâmpada geradora do pulso luminoso.

## 3. APRESENTAÇÃO DO SIMULADOR SOLAR

O simulador solar *SunSim 3c*, fornecido pela PASAN, membro da *Meyer Burger Group*, é um sistema composto por 6 partes diferentes que serão descritas a seguir. Os motivos pela escolha deste simulador são descritos com detalhes em Souza et al. (2012), mas pode-se citar as características da fonte luminosa, superando todos os requisitos da norma

internacional IEC 60904-9 (2007) sendo classificado como  $A^+A^+A^+$ , e cujas características básicas estão apresentadas na Tab. 1.

Norma	Classe AAA	$\frac{SunSim3C}{A^{+}A^{+}A^{+}}$
Não-uniformidade espacial	$\leq$ 2 %	$\leq$ 1,0%
Instabilidade temporal (LTI)	$\leq$ 2 %	$\leq$ 1,0%
Casamento espectral	$\leq \pm 25\%$	≤±12,5 %

Tabela 1 - Classificação do modelo SumSim 3c de acordo com a IEC 60904-9

## 3.1 Túnel

O túnel é usado para evitar a incidência de reflexões indesejadas da luz emitida pela fonte luminosa e que possam atingir o módulo. O uso de diafragmas internos ajuda a alcançar uma uniformidade espacial de classe A+. O interior do túnel deve ser perfeitamente preto para garantir uma classe de espectro A+. Deve-se entender que a cor preta aqui não se refere somente à absorção na faixa visível do espectro, pois o revestimento deve também absorver radiação infravermelha na faixa de resposta espectral dos módulos fotovoltaicos. Além de absorver a luz, a pequena fração de luz refletida deve ser espalhada, não é desejável nenhuma reflexão especular.

#### 3.2 Caixas das lâmpadas e fonte de potência

A luminária que produz os pulsos luminosos é dotada de duas lâmpadas de Xe, no modelo adquirido pelo LABSOL. Em outro modelo do mesmo fabricante há 4 lâmpadas instaladas na mesma caixa. A caixa das lâmpadas deve ser instalada em uma das extremidades do túnel. Para estabelecer uma correta uniformidade é importante projetar cuidadosamente o sistema de fixação entre a caixa das lâmpadas e o túnel como também alinhar a caixa com o resto do túnel. O fabricante fornece um sistema com parafusos de ajuste de posicionamento para o perfeito alinhamento

Uma fonte de potência com um banco de capacitores fornecerá a potência necessária para que a caixa das lâmpadas dispare o flash. A fonte não tem impacto no projeto do túnel, mas seu tamanho deve ser levado em conta no layout exterior.

#### 3.4 Célula de referência

A célula de referência é uma célula solar de silício de 20 mm x 20 mm, usada para medir e regular a intensidade da luz da caixa das lâmpadas. A célula é deve ser colocada em um ponto fixo dentro da área de iluminação uniforme no plano do módulo fotovoltaico sob ensaio.

## 4. METODOLOGIA DO ESTUDO

Para a escolha da superfície de revestimento interno do túnel foi medida com um espectro radiômetro a refletividade espectral de oito diferentes materiais cogitados para o emprego nas paredes, piso e teto do túnel. Também foi realizada uma simulação do túnel com o *software* de simulação de desempenho termo energético EnergyPlus para determinação da carga térmica e potência do ar condicionado.

#### 4.1 Estudo do revestimento interno

O espectro radiômetro utilizado é o modelo *Black CXR-SR-50* da marca Apogee. O experimento consiste em iluminar os materiais com uma lâmpada halógena de 300 W, que cobre de forma adequada tanto o espectro visível quanto o infravermelho, instalada em um refletor num ângulo de aproximadamente 45 ° e medir sua refletividade especular para esse ângulo, utilizando uma superfície branca de sulfato de bário como padrão de refletividade difusa. A refletividade especular é geralmente estudada para superfícies especulares e com padrão também especular. Ocorre que, neste caso, se quer comparar, entre as duas superfícies de reflexão difusa, não apenas aquela que menos reflete de forma hemisférica, mas, principalmente, a que menos reflete na direção especular. As intensidades espectrais medidas são comparadas com valores medidos com a superfície branca padrão. A pastilha de sulfato de bário é um padrão comercial para refletividade em esferas integradoras e sua refletividade hemisférica pode ser considerada como sendo 100 %. Este padrão também apresenta perfeita distribuição espacial da radiação, ou seja, é um refletor difuso. Assim, é possível estimar a refletividade de cada material de forma mais eficaz para seu uso no túnel e compará-los. A Fig. 2 mostra um desenho esquemático do experimento. A Tab. 2 mostra os materiais que foram utilizados no experimento para comparação.



Figura 2- Teste de refletividade realizado nos diferentes materiais.

MDF Preto	Adesivo automotivo preto	Adesivo automotivo preto	Tinta esmalte base agua
	fosco marca ColorMax	comum marca ColorMax	preta fosca Toda Cor
Tecido preto	Espuma elastomérica marca	Espuma elastomérica marca	Tapete Borracha piso
	K-FLEX	K-FLEX lixada	diamante esp. 1,5mm

Tabela 2 – Lista dos materiais comparados.

#### 4.2 Dimensionamento do condicionador de ar

Dentre os fatores que influenciam no dimensionamento do ar condicionado, os mais importantes são as características do envoltório do túnel, as trocas de ar que acontecem devido à infiltração e as características do local onde esse túnel está. O túnel fica dentro de um dos prédios do LABSOL, que ficam situados na cidade de Porto Alegre no estado do Rio Grande do Sul.

A metodologia para dimensionar o ar condicionado consiste em desenhar o prédio do LABSOL, com as construções existentes e também o túnel com as dimensões e materiais propostos. A simulação será realizada para diferentes valores de trocas de ar para verificação da potência do ar condicionado necessária para manter a temperatura dentro do túnel em 25 °C. Os softwares SketchUp e o EnergyPlus foram utilizados nessa simulação. Os dados climáticos para a simulação foram obtidos na pagina da internet do Laboratório de Eficiência Energética de Edificações (Labee) que disponibiliza arquivos climáticos para diversas cidades brasileiras (http://www.labee.ufsc.br).

A simulação no EnergyPlus considera o túnel como uma zona térmica cujo ar interior é perfeitamente misturado, ou seja, o programa faz o balanço de energia no interior do túnel sem considerar efeitos do escoamento do ar e da distribuição do ar interior. Sabe-se que o local aonde o ar condicionado será instalado é muito importante e devem ser consideradas alternativas para possibilitar a boa distribuição do ar interior, para que todo o ambiente fique com temperatura aproximadamente igual.

O prédio onde o simulador será instalado também possui ar condicionado dimensionado para manter o ambiente em 25 °C ao redor do túnel, contudo decidiu-se instalar outro ar condicionado no interior do túnel para recuperar a condição de temperatura mais rapidamente. Na simulação da carga térmica do túnel foi considerado que os condicionadores de ar do prédio estão desligados. Nesta condição o prédio funciona apenas como um isolamento para o túnel na simulação de operação a 25°C.

# 5. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS EXTERNAS.

Para a construção do túnel foram considerados vários materiais e técnicas de montagem, tais como divisórias de cimento, de gesso, de madeira aglomerada, de MDF entre outras. A similaridade da construção desejada com uma câmara frigorífica e a tecnologia de instalação destes equipamentos, tão difundida, guiaram a decisão. Duas chapas finas de aço com grande camada de isolamento térmico no interior é o material que tipicamente se utiliza na construção de câmaras frigoríficas. Com o objetivo de tornar o túnel rígido o suficiente e bem isolado termicamente, e ainda com possibilidade de instalar portas em lugares estratégicos decidiu-se encomendar as chapas para a montagem conforme o projeto das Fig. 3 e 4. A Tab. 3 mostra os materiais e espessuras das paredes e a Fig. 5 mostra fotos externas do túnel já instalado no prédio do LABSOL.

Material	espessura
Chapa de aço cor branca	1 mm
Poliestireno expandido	98 mm
Chapa de aço cor branca	1 mm

Tabela 3 - Composição das paredes externas do túnel.



Figura 3- Desenho da vista superior do túnel para o simulador solar com dimensões em mm.



Figura 4 - Corte AA da Fig. 3 mostrando vista lateral do túnel.

V Congresso Brasileiro de Energia Solar - Recife, 31 de Março a 03 de Abril de 2014.



Figura 5- Foto do túnel montado dentro do prédio do LABSOL com suporte para a luminária.



Figura 6 - Foto do túnel montado dentro do prédio do LABSOL.

As aberturas do túnel, também mostradas na foto das Fig. 5 e 6 são duas portas, sendo uma delas de correr e suficientemente grande para permitir a entrada e saída dos módulos. Como se pode ver na Fig. 3, o comprimento total do túnel ficou em 6,7 m, mas o módulo vai ficar posicionado na distância especificada pelo fabricante que é de 5,5 m. Foi considerado um espaço atrás do módulo para modificações futuras, ou instalação de algum aquecedor para ensaios de coeficientes térmicos e outros efeitos com aquecimento. O recorte dos diafragmas nas divisórias foi feito com um excesso de 15 cm, espaço depois preenchido por uma fina chapa de aço (1 mm) para dar ajuste mais perfeito de posicionamento e evitar reflexões na superfície do próprio diafragma, respeitando as distâncias entre os colimadores mostradas na Fig. 1. Esta providência também é requerida pelas instruções oferecidas pelo fabricante.

# 6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA A SELEÇÃO DO REVESTIMENTO INTERNO.

A refletividade é definida como a fração de energia incidente na superfície de um corpo que é refletida por esse corpo.

$$Refletividade \equiv \rho = \frac{Energia refletida pelo corpo}{Energia incidente no corpo}$$
(1)

A refletividade do corpo negro é igual a zero para todos os comprimentos de onda. Mais especificamente a refletividade de interesse pode ser definida como refletividade monocromática hemisférica total  $\rho$ , representando a total integrada sobre todas as direções mas determinada em cada comprimento de onda. Desta forma não depende do espectro da luz utilizada como fonte.

As superfícies podem ser idealizadas como difusas ou especulares, de acordo com a maneira pela qual elas refletem a radiação. Na Figura 7, pode-se observar que a reflexão difusa ocorre se a intensidade da radiação refletida for

independente do ângulo de reflexão, também independente da direção da radiação incidente; e que a reflexão especular ocorre se toda a reflexão for na direção de  $\theta_2$ , que equivale ao ângulo incidente  $\theta_1$ .

Embora nenhuma superfície seja perfeitamente difusa ou especular, a condição difusa é melhor aproximada por superfícies rugosas, e a condição especular por superfícies polidas como espelhos.



Figura 7 - Reflexões difusa e especular (Incropera e DeWitt, 2003).

No caso dos materiais estudados o ideal seria se a superfície absorvesse toda a luz incidente. Ao medir a refletividade monocromática hemisférica, observa-se que todas as amostras tem um alto poder de absorção, mostrando refletividade hemisférica muito baixa e fica difícil dizer qual delas é mais adequada para uso no revestimento do túnel do simulador solar. No entanto ao realizar as medições na direção de reflexão especular, como no experimento apresentado na Fig. 2, as diferenças aparecem, pois alguns materiais tem uma componente especular mais acentuada. A fração de luz refletida de forma especular pode formar imagens sobre o plano do módulo, prejudicando a uniformidade da iluminação. O gráfico da Fig. 8 mostra a refletividade especular dos materiais obtida experimentalmente nesse trabalho. Os resultados são mostrados para comprimentos de onda entre 400 e 1100 nm, banda de sensibilidade do espectrorradiômetro utilizado nas medidas.



Figura 8 - Refletividade especular dos materiais medidos.

É possível concluir que, apesar de todos os materiais possuírem cor preta e apresentarem um aspecto visualmente parecido, como pode ser visto na Tab.1, o experimento mostra que a refletividade desses materiais é bastante diferente. Todos os materiais estão na faixa adequada para serem catalogados como materiais pretos (400 nm-1100 nm), mas claramente uns tem maior absortividade que os outros. No caso do MDF, apesar de ser visivelmente preto, o gráfico mostra que ele reflete até 25% da energia incidente para comprimentos de onda próximos de 850 nm. Essa reflexão é visível em alguns ângulos quando o material está bem iluminado, notando-se a superfície com brilho. Os adesivos pretos e a espuma normal apresentam um bom comportamento, absorvendo até 93% da luz incidente nesse experimento. O tecido preto presenta a maior absortividade no espectro visível, mas aumenta consideravelmente para comprimentos de onda maiores que 650 nm, chegando a valores superiores a 50 % de refletividade. Esse comportamento não é observável a olho nu porque o espectro visível chega a aproximadamente 700 nm.

A manta de espuma elastomérica K-Flex (2013) é um material com bom isolamento térmico (k = 0,034 W/m.K), bastante resistente mecanicamente, resistência térmica entre -  $200^{\circ}$ C e + $105^{\circ}$ C, e também de fácil instalação. Após passar pelo processo de lixamento, a manta de espuma adquiriu superfície rugosa e sua refletividade especular apresentou o melhor resultado dentre os materiais comparados, como pode ser visto no gráfico da Fig. 8. Dessa maneira, decidiu-se por instalar a manta lixada nas paredes internas do túnel e, nos locais aonde não foi possível instalar a manta, utilizou-se a tinta preta fosca que apresentou o segundo melhor resultado.

Os materiais que apresentaram menores valores de refletividade nesse experimento foram a tinta preta fosca, a manta de espuma preta lixada e o tapete de borracha. Esses foram os três materiais utilizados no revestimento interno do túnel. A manta de espuma preta lixada foi utilizada para revestir as paredes, também ajuda no isolamento térmico e apresentou a menor refletividade, como se pode ver no gráfico da Fig. 8. Alguns locais no interior do túnel foram pintados com a tinta preta fosca, como o ar condicionado, os ventiladores e as chapas de aço dos colimadores. Para o piso do compartimento dos módulos, optou-se por um tapete de borracha preto, mais denso e mais resistente do que a manta de espuma elastomérica devido ao maior tráfego de pessoas ao posicionar os módulos no suporte. O tapete de borracha preto, para uso em interiores de automóveis, em seu lado com acabamento fosco, apresenta também um ótimo resultado em refletividade especular, mas é pesado e mais caro alem da dificuldade de instalação nas paredes.

# 7. SIMULAÇÃO DE CARGA TÉRMICA.

Escolhido o material para o revestimento interno do túnel, é possível simular o desempenho energético do interior do túnel ao longo do ano climático e verificar a potência de ar condicionado necessária para manter a temperatura em 25 °C. As propriedades dos materiais utilizadas na simulação foram retiradas de ASHRAE, 2005 e podem ser vistas na Tab. 4. A Fig. 9 mostra o desenho no SketchUp do prédio do LABSOL e o túnel com as dimensões já descritas no seu interior.

Material	Espessura	Condutividade	Densidade	Calor específico
	(mm)	(W/m.K)	$(kg/m^3)$	(J/kg.K)
Chapa de aço cor branca	1	45,28	7824	500
Poliestireno expandido	98	0,037	16	1210
Espuma cor preta	8	0,032	72	1680

Tabela 4 - Propriedades dos materiais utilizados. (ASHRAE, 2005).





Conforme descrito na metodologia, foram simulados diferentes casos variando-se as trocas de ar no interior do túnel. Essa estratégia foi tomada porque as aberturas do túnel são bastante grandes quando comparadas ao seu volume. Ainda, será comum deixar a porta do túnel aberta por alguns minutos para colocar e retirar módulos fotovoltaicos do seu interior. Dessa maneira, o ar condicionado precisa compensar todas estas perdas térmicas.

A Tab. 4 mostra os resultados obtidos, variando-se as trocas de ar de 0,5 trocas por hora até 8 trocas por hora. O túnel troca calor com o interior do prédio onde está instalado considerando que os condicionadores de ar do prédio estão desligados o ano climático inteiro. Assim, a carga térmica da Tab. 5 é a carga quando apenas o ar condicionado do túnel estiver ligado.

Tabela 5 - Valores de carga térmica de verão e inverno calculados para o túnel, em BTU/h, variando-se as trocas de ar.

Troca de ar por hora	Carga térmica (BTU/h)		
	Verão	Inverno	
0,5	2159	2301	
2	3604	3841	
4	5530	5893	
8	9378	9994	

Os resultados mostram que a infiltração de ar tem grande influencia na carga térmica, contudo, mesmo com oito trocas de ar por hora, que é um valor bastante elevado, a carga térmica do túnel ficou com valores menores que 10.000 BTU/h. Conforme esperado, a carga térmica de inverno resultou maior que a de verão, já que a diferença de temperatura em relação aos dias de projeto é maior no inverno do que no verão.

Considerando os resultados da simulação, decidiu-se por instalar um ar condicionado do tipo *Split inverter*. A característica *inverter* foi selecionada por atribuir maior controle no ajuste de temperatura do ar condicionado. A menor potência encontrada no mercado com esse recurso foi de 12.000 BTU/h, portanto, foi instalado um condicionador com essa potência.

# 8. CARACTERÍSTICAS INTERNAS E DESCRIÇÃO DA MONTAGEM.

A Fig. 10 mostra o interior do túnel, revestido com a espuma preta K-FLEX que foi lixada para melhorar sua absortividade e assim evitar as reflexões especulares nas paredes para garantir maior uniformidade de iluminação. As fotografias das Fig. 10 e 11 foram manipuladas para um cinza mais claro permitindo visualizar o interior do túnel



Figura 10 – Interior do túnel para simulador solar

com revestimento de alta absortividade.



Figura 11–Sistema de ar condicionado Split e quatro ventiladores contíguos.

Foi instalado no túnel um sistema de ar acondicionado Split na câmera central, Fig. 11, e oito ventiladores nos diafragmas internos para a circulação do ar. A unidade de ar condicionado e os ventiladores são originalmente brancos, mas foram pintados com a tinta preta fosca para evitar reflexões em sua superfície.

# 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da refletividade na construção do túnel é de vital importância para a escolha do material de revestimento adequado que garanta que o teste dos módulos solares esteja dentro dos parâmetros impostos pelo INMETRO. É imprescindível que o material escolhido para o revestimento possua baixa refletividade em todos os comprimentos de onda em que os módulos fotovoltaicos são sensíveis, incluindo a região do infravermelho.

Respeitar as especificações de montagem fornecidas pelo fabricante é necessário para obter bons resultados nos testes. Optou-se por utilizar o poliestireno expandido coberto com a chapa de aço para criar um ambiente isolado termicamente. Similarmente, foi instalado o sistema de ar condicionado com os oito ventiladores, para manter a temperatura no valor padrão e uniforme em todo do túnel.

Após a construção do túnel, foi feito o teste de aceitação segundo norma internacional IEC 60904-9 (2007), a uniformidade medida no plano de teste foi de 0,28%, cumprindo assim com o valor apresentado na tabela 1 ( $\leq$ 1%).

Considerando tanto os custos de materiais e de mão de obra, as despesas da construção e revestimento do túnel totalizaram R\$24.000,00. Já que o orçamento oferecido pelo fabricante do simulador solar para o túnel instalado foi de R\$105.000,00, verifica-se uma proporção de quatro vezes menos custo.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e ao Instituto de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia vinculado ao projeto INCT/MCT/CNPq pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

# REFERÊNCIAS

- ASHRAE, 2005 American Society of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook Fundamentals. p. 30.12. Atlanta, 2005.
- EPIA European Photovoltaic Industry Association, 2012 Photovoltaic Energy-Electricity from the Sun. Disponível em < http://www.epia.org>
- EnergyPlus Energy Simulation Software. Energy Efficiency & Renewable Energy. U.S Department of Energy. Disponível em < http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/register.cfm?goto=eplus>
- IEC 60891 (International Electrotechnical Commission), 2009 Procedures for temperature and irradiance correction to measured I-V characteristics.
- IEC 60904-9 (International Electrotechnical Commission), 2007 Photovoltaic Devices Part 9: Solar simulator performance requirements.
- Incropera, F. P., Dewitt D. P., 2011. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons.
- K-Flex, 2013, Ficha técnica da manta de espuma elastomérica, disponível em <a href="http://www.polipex.com/\_pics/\_produtos/\_kflex\_st/\_ft/ft\_kflex\_st.pdf">http://www.polipex.com/\_pics/\_produtos/\_kflex\_st/\_ft/ft\_kflex\_st.pdf</a>>
- Labee, 2013. Laboratório de Eficiência Energética de Edificações. Arquivos climáticos. Disponível em
- <a href="http://www.labee.ufsc.br">http://www.labee.ufsc.br</a>>, acessado em novembro de 2013.
- Pasan, Measurement Systems, 2013. Tunnel construction guidelines.
- REN21, 2013. Renewables Global Status Report. P. 13. Disponível em < http://www.ren21.net> acessado em Novembro de 2013.
- SketchUp. Parte de Trimble Buildings. Disponível em <http://www.sketchup.com/download>
- Souza, R. B. ; Prieb, César W. M. ; Krenzinger, A., 2012 . Ensaio de Módulos Fotovoltaicos no Labsol Ufrgs. In: XV Congreso Ibérico y X Congreso Iberoamericano de Energía Solar, 2012, Vigo. Libro de Actas del XV Congreso Ibérico y X Congreso Iberoamericano de Energía Solar. Vigo, Espanha: Reprogalicia, 2012. v. 1. p. 385-390.
- Taylor, N. et al., 2010. Guidelines for PV Power Measurement in Industry, Relatório disponível em http://www.jrc.ec.europa.eu/ sob o número EUR 24359 EN, 2010.

## DESIGN AND ASSEMBLY OF A TUNNEL FOR SOLAR SIMULATOR

Abstract. Solar energy research is becoming increasingly important with the growth of renewable energies. With that in mind, the Solar Energy Laboratory of the Federal University of Rio Grande do Sul acquired a solar simulator to measure electrical characteristics of photovoltaic modules. These tests are required by the National Institute of Metrology, Quality and Technology so that the photovoltaic modules can be commercialized in Brazil. The aim of this work is to study and describe the installation of the solar simulator tunnel. The manufacturer of the equipment can provide such tunnel, however, it was decided to develop and build the tunnel in the laboratory according to the guidelines indicated by the manufacturer. The tunnel must have diaphragms and dimensions according to these guidelines. It also needs to be internally covered by a surface with high absorptivity to minimize reflections of radiation on the walls. The cover materials options were tested in experiments comparing the spectral reflectivity of different materials. The standard test conditions required that the module is at 25 °C, so the tunnel heat load was calculated using the simulation software for thermal energy performance EnergyPlus in order to select the appropriated air conditioner. The results showed that the best material among for the inner lining of the walls was a black foam, chosen among six other materials: a black fabric, a black painted MDF, a black matte automotive adhesive, a black common automotive adhesive, a black paint and black standard foam. The air conditioning load was calculated for different values of air changes of the tunnel, and for four exchanges of air per hour resulted in the thermal load 5893 BTU / h. The materials used and the tunnel assembly are also described in the paper.

Key words: Solar Energy, Photovoltaic Models, Solar Simulator, Reflectivity.