

# DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO ESPECTRAL DA IRRADIÂNCIA NA SUBSTITUIÇÃO DAS LÂMPADAS DE UM SIMULADOR SOLAR

**Luiz Antonio Piccoli Junior** (UFRGS) - luizpiccolijr@gmail.com

**André Luís Winck** (UFRGS) - andreloiswinck@gmail.com

**Arno Krenzinger** (UFRGS) - arno.krenzinger@ufrgs.br

## **Resumo:**

*Este trabalho apresenta uma análise do espectro da irradiância em um simulador pulsado instalado no Laboratório de Energia Solar da UFRGS (LABSOL) para lâmpadas com 8600 disparos e também para lâmpadas novas. Para isso, é utilizado um espectrorradiômetro capaz de medir o espectro entre 342 e 1166 nm. Neste trabalho também é apresentada a metodologia de calibração do espectrorradiômetro, que é realizada através da comparação da medição da irradiância direta e do espectro obtido pelo modelo de transferência radiativa SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine). Para utilizar este modelo, foi necessário obter dados de satélites e estações meteorológicas para o dia e hora da medição realizada. Com a obtenção dos espectros do simulador, foi possível calcular e comparar os fatores de descasamento espectral de módulos de diferentes tecnologias para cada configuração de lâmpadas. Os resultados obtidos mostraram que a calibração do espectrorradiômetro realizada possibilitou obter o espectro do simulador pulsado com boa qualidade, visto que na sua comparação com o espectro padrão o resultado se mostrou satisfatório. As análises de descasamento espectral possibilitaram avaliar o impacto do envelhecimento das lâmpadas do simulador na qualidade da caracterização de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos.*

**Palavras-chave:** *Simulador Solar, Distribuição Espectral, Descasamento Espectral*

**Área temática:** *Radiação Solar*

**Subárea temática:** *Recursos Solares e Meteorologia da Radiação Solar*

# DETERMINAÇÃO DA VARIAÇÃO ESPECTRAL DA IRRADIÂNCIA NA SUBSTITUIÇÃO DAS LÂMPADAS DE UM SIMULADOR SOLAR

**Luiz Antonio Piccoli Junior**– luizpiccolijr@gmail.com

**André Luís Winck**– andreluiswinck@gmail.com

**Arno Krenzinger**– arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPGE3M, LABSOL, Escola de Engenharia.

**Resumo.** Este trabalho apresenta uma análise do espectro da irradiância em um simulador pulsado instalado no Laboratório de Energia Solar da UFRGS (LABSOL) para lâmpadas com 8600 disparos e também para lâmpadas novas. Para isso, é utilizado um espectrorradiômetro capaz de medir o espectro entre 342 e 1166 nm. Neste trabalho também é apresentada a metodologia de calibração do espectrorradiômetro, que é realizada através da comparação da medição da irradiância direta e do espectro obtido pelo modelo de transferência radiativa SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine). Para utilizar este modelo, foi necessário obter dados de satélites e estações meteorológicas para o dia e hora da medição realizada. Com a obtenção dos espectros do simulador, foi possível calcular e comparar os fatores de descasamento espectral de módulos de diferentes tecnologias para cada configuração de lâmpadas. Os resultados obtidos mostraram que a calibração do espectrorradiômetro realizada possibilitou obter o espectro do simulador pulsado com boa qualidade, visto que na sua comparação com o espectro padrão o resultado se mostrou satisfatório. As análises de descasamento espectral possibilitaram avaliar o impacto do envelhecimento das lâmpadas do simulador na qualidade da caracterização de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos.

**Palavras-chave:** Simulador Solar, Distribuição Espectral, Descasamento Espectral

## 1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica (PV) deverá desempenhar um papel fundamental no futuro sistema global de energia sustentável. Foram realizados desenvolvimentos impressionantes em termos de escala de implantação, redução de custos e melhoria de desempenho, mais visivelmente na última década. A conversão fotovoltaica pode ser feita com uma ampla gama de materiais, arquiteturas e tecnologias de dispositivos, em níveis muito diferentes de maturidade técnica e econômica.

Os módulos fotovoltaicos existem desde 1954 e foram fabricados inicialmente para carregar baterias. Entretanto, os jornalistas da época, conforme Perlin (2004), já visualizavam aplicações maiores: “Podem fornecer mais poder do que todo o carvão, petróleo, e urânio.” “O começo de uma nova era, levando eventualmente à realização de um dos sonhos mais estimados - o aproveitamento da energia quase ilimitada do sol para os usos da civilização.” A caracterização elétrica de módulos em simuladores solares é realizada a partir da análise da sua curva corrente e tensão. A determinação experimental da curva  $I-V$  é feita sob um conjunto de condições específicas definidas pela norma IEC 60904-3 (2019), que define as STC (*Standard Test Conditions*), condições padrão para o teste de módulos fotovoltaicos:

- Irradiância incidente: 1000 W/m<sup>2</sup>;
- Espectro da irradiância incidente: AM1.5G;
- Temperatura da célula: 25 °C;

De acordo com Souza, Prieb e Krenzinger (2012) e Galdino (2014), as características recomendadas para o equipamento de um simulador solar no estado-da-arte da tecnologia, destinado ao ensaio de módulos fotovoltaicos de acordo com as versões da norma IEC 61215 (2016) são as seguintes:

- Lâmpada de Xenon em operação monopulso;
- Montagem em câmara escura, com área de teste mínima de 2m x 2m;
- Classe A+A+A+, certificada por laboratório independente reconhecido;
- Operação com irradiâncias de 1000 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup> e 200 W/m<sup>2</sup>, com distribuição espectral AM1.5G;
- Carga eletrônica com operação em três quadrantes, adequada às faixas de tensão, corrente e potência que se deseja medir.

Neste contexto, equipamentos para caracterização elétrica de módulos, tais como simuladores solares, precisam ser periodicamente avaliados para garantir uma correta qualificação dos módulos fotovoltaicos.

## 1.1 Fator de Descasamento Espectral

A Norma IEC 60904-7: 2019 descreve os procedimentos para a correção do erro introduzido na caracterização de um dispositivo fotovoltaico causado pelo descasamento entre a distribuição espectral da radiação incidente utilizada no ensaio e o espectro de referência AM 1.5, levando em conta a resposta espectral na célula de referência do dispositivo sob teste, conforme Eq. (1). Este fator de descasamento espectral busca não só corrigir as variações espectrais entre o espectro de ensaio e o espectro de referência, mas também corrigir o descasamento entre as respostas espectrais (SR) da célula de referência e o do dispositivo em teste (Bühler; Krenzinger; Souza, 2011; Tzamalís; Mülllejans, 2011).

$$MM = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} SR_{MÓDULO}(\lambda) G_{SIMULADOR}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} SR_{MÓDULO} G_{STC}(\lambda) d\lambda} \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} SR_{REFERÊNCIA}(\lambda) G_{STC}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} SR_{REFERÊNCIA} G_{SIMULADOR}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

Onde  $MM$  é o fator de descasamento espectral,  $SR_{MÓDULO}$  e  $SR_{REFERÊNCIA}$  correspondem à curva de resposta espectral do dispositivo em ensaio e da célula de referência, respectivamente e  $G_{SIMULADOR}$  e  $G_{STC}$  correspondem à distribuição espectral na condição medida e na condição padrão ou outra qualquer, respectivamente. Os intervalos  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$  a  $\lambda_4$  correspondem à faixa dentro da distribuição espectral na qual o dispositivo em ensaio e a célula de referência, respectivamente, apresentam resposta espectral.

De acordo com Gasparin, Bühler e Krenzinger (2012), quando se aplica um procedimento de correção espectral para um dispositivo fotovoltaico de mais de uma junção deve-se levar em conta que, estando as células ligadas em série, a corrente fornecida pelo conjunto será limitada pela menor corrente gerada por cada junção. Desta maneira, a junção limitadora de corrente é determinada verificando qual o menor valor obtido no cálculo da densidade de corrente (J) dada pela integral expressa na Eq. (2), que é aplicada à curva de resposta espectral de cada junção. Uma vez determinada a junção limitadora de corrente realiza-se o cálculo do fator de descasamento espectral com a resposta espectral desta junção.

$$J = \int SR_{JUNÇÃO}(\lambda) \cdot E_{MEDIDOouREF}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Onde  $SR_{JUNÇÃO}$  corresponde a resposta espectral de cada uma das junções do módulo em teste e  $E_{MEDIDOouREF}$  corresponde ao espectro medido ou ao espectro de referência AM 1.5.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Materiais

**Células.** Foram utilizadas no LABSOL-UFRGS seis modelos de células de referência, da marca Konica Minolta (Tab.1), com várias respostas espectrais correspondentes a diferentes tecnologias de células fotovoltaicas. Na Fig.1 são apresentadas as respostas espectrais relativas das células de referência série AK da Konica Minolta, onde pode-se observar que a célula de referência AK-200, que representa a tecnologia de silício monocristalino, possui ampla resposta espectral que engloba a faixa de 300 nm até aproximadamente 1150 nm.

Tabela 1- Células de referência Konica Minolta e respectivas correntes de calibração.

Células	Corrente Curto Circuito ( $I_{SCref}$ )	Aplicação
AK-100	44,56 mA	Células solares de dupla junção: a-Si/ $\mu$ -Si (camada superior a-Si)
AK-110	15,92 mA	Células solares de dupla junção: a-Si/ $\mu$ -Si (camada inferior $\mu$ -Si)
AK-120	24,01 mA	Células solares de tripla junção (camada superior a-Si)
AK-130	17,06 mA	Células solares de tripla junção (camada intermediária a-Si)
AK-140	13,18 mA	Células solares de tripla junção (camada inferior a-Si)
AK-200	132,32 mA	Células solares de m-Si

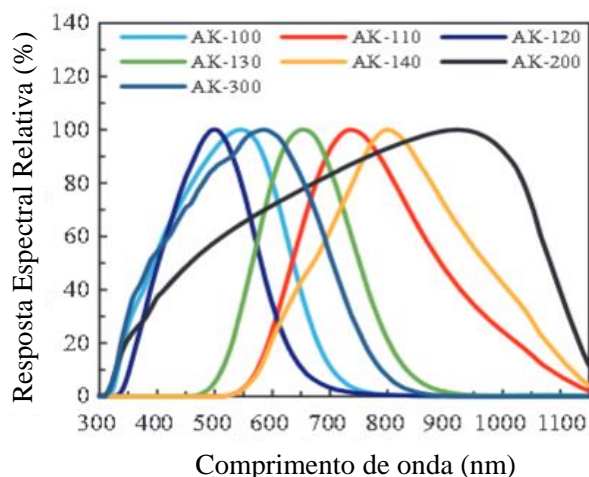


Figura 1 - Respostas espectrais relativas das células de referência da Konica Minolta. Adaptado de Nishikawa *et al* (2015).

**Simulador Solar.** O simulador solar SunSim 3C do Labsol, fornecido pela PASAN, possui um *flash* com duas lâmpadas de *xenon* e atende a segunda edição da norma internacional de requisitos de desempenho de simuladores solares IEC 60904-9:2007. Esta edição da norma classifica os simuladores em três categorias. A primeira letra é a classificação dada para o casamento espectral, a segunda para a não-uniformidade espacial e a terceira para a instabilidade temporal. O modelo SunSim 3C é classificado como A+A+A+ apresentando uma correspondência espectral duas vezes melhor que os requisitos da classe A da norma IEC. Suas características básicas estão apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2- Classificação do modelo SunSim 3C de acordo com a IEC 60904-9.

CATEGORIA	CLASSE - AAA	SunSim 3C - A+A+A+
Casamento espectral	$\leq \pm 25\%$	$\leq \pm 12,5\%$
Não uniformidade espacial	$\leq 2\%$	$\leq 1,0\%$
Instabilidade temporal (LTI)	$\leq 2\%$	$\leq 1,0\%$

Conforme Souza, Prieb e Krenzinger (2012) a classificação dos simuladores solares em relação ao casamento espectral refere-se à razão entre as integrais do espectro padrão e do espectro dado pelo simulador, em uma determinada faixa de comprimentos de onda. A classe será dada de acordo com o pior resultado, considerando os seis intervalos de comprimento de onda de interesse. A Tab. 3 mostra estes intervalos com os seus respectivos percentuais de irradiância em relação ao espectro padrão.

Tabela 3 - Distribuição da irradiância espectral padrão.

	Faixa de comprimento de onda (nm)	Percentual da irradiância total na faixa de comprimento de onda (400 nm - 1100 nm)
1	400-500	18,40%
2	500-600	19,90%
3	600-700	18,40%
4	700-800	14,90%
5	800-900	12,50%
6	900-1100	15,90%

**Espectrorradiômetro.** Para capturar o espectro do simulador solar foi utilizado o espectrorradiômetro EPP-2000-VIS-50 do fabricante Stellar Net com 2048 *pixels* de resolução para uma faixa de 342 a 1166 nm de comprimento de onda. Neste trabalho, foi utilizado um atenuador de intensidade na sonda óptica para evitar a saturação do instrumento. O material do atenuador é politetrafluoroetileno (Teflon®).

## 2.2 Procedimentos experimentais

**Definição de um fator de correção para os dados medidos pelo espectrorradiômetro EPP-2000.** Como parte deste trabalho, foi realizada uma calibração do espectrorradiômetro através da medição do espectro da radiação solar direta e comparação com espectro calculado através do modelo de transferência radiativa SMARTS2 (*Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine*). Conforme mostrou Haag (2012), este modelo possibilita a obtenção do espectro solar estimado através de dados atmosféricos que influem na sua caracterização.

A medição do espectro da radiação solar direta foi realizada acoplando-se um colimador fabricado em laboratório, para este fim, a um pireliômetro com o objetivo de utilizar seu sistema de mira. A imagem da Fig. 2 mostra este experimento. As medições foram realizadas dia 20/11/2019, na cidade de Porto Alegre em horário próximo ao meio dia solar (12:40) em dia de céu limpo, com índice de limpidez  $K_T = 0,78$ .

Através da metodologia apresentada em Haag, 2012, foram obtidos para o mesmo dia, através de dados de satélites, de estações meteorológicas e de radiossondas, os índices de AOD, água precipitada,  $CO_2$  e ozônio para inserção no software SMARTS2, conforme apresentado na Tab. 4. A Fig. 3 e a Fig. 4 mostram o espectro sem correção obtido com o espectrorradiômetro e o espectro de referência calculado com o SMARTS2, respectivamente. Desta maneira, dividindo-se o valor bruto obtido pelo espectrorradiômetro pela irradiância do espectro de referência, para cada comprimento de onda, obteve-se o fator de calibração do instrumento. O espectro da radiação solar direta foi obtido com tempo de integração igual a 100 milissegundos.



Figura 2 – Imagem do colimador de PVC acoplado a um sistema de mira e sonda do espectrorradiômetro para medição do espectro da radiação solar direta.

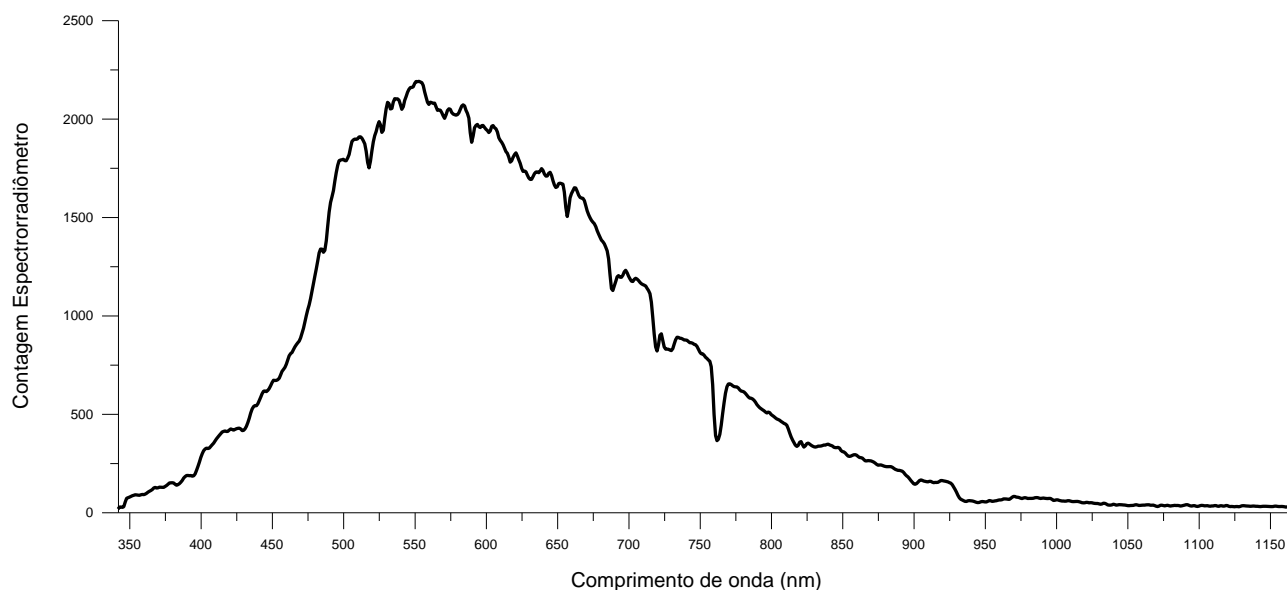


Figura 3 – Espectro da radiação solar direta obtido no experimento, sem aplicação do fator de correção.

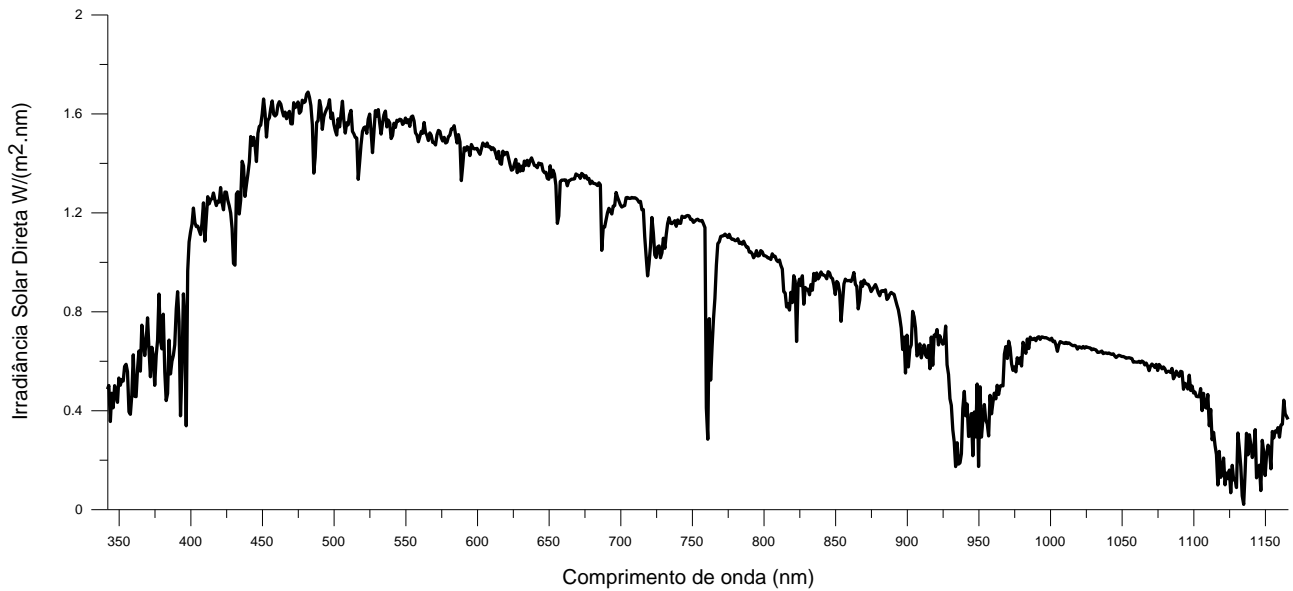


Figura 4 – Espectro da radiação solar direta obtido com o software SMARTS2 com os dados atmosféricos inseridos.

Tabela 4 – Parâmetros atmosféricos obtidos para estimativa do espectro com software SMARTS2.

Parâmetro	Fonte de dados	Valor	Unidade
AOD (500nm)	OMAERUVd - OMI	0,0107	Adimensional
Ozônio	OMDOAO3 e OMTO3e - OMI	0,2912	DU
Água Precipitada	MYD08 e MOD08 - MODIS TERRA e AQUA	1,6425	cm
CO <sub>2</sub>	Mauna Loa e CSIRO	413,92	ppm
Pressão Atmosférica	INPE	1015	hPa

**Medição do espectro do simulador solar.** O simulador solar utilizado neste trabalho possui um *flash* com tempo de aproximadamente 10 ms. Para conseguir captar o espectro do simulador, o instrumento foi configurado para medir com tempo de integração de 100 ms. Igualmente, foi utilizado um recurso de *trigger* óptico do instrumento para armazenar o espectro dentro dos 10ms em que o *flash* foi disparado. Com o objetivo de evitar a saturação do espectrorradiômetro, utilizou-se um atenuador na entrada da fibra óptica, feito de politetrafluoroetileno. A Fig. 5 mostra duas imagens deste experimento.



(a)

(b)

Figura 5 – (a) Imagem do experimento de medição do espectro do simulador solar (b) Mesmo dispositivo com vista ampliada.

O espectro do simulador solar foi medido com lâmpadas novas e também com lâmpadas com 8600 disparos. Segundo Souza, Prieb e Krenzinger (2012) a lâmpada tem garantia de um mínimo de 10000 pulsos e uma vida típica entre 15000 e 20000 pulsos. Ambas as medições, ainda sem a aplicação do fator de correção, podem ser vistas no gráfico da Fig. 6.

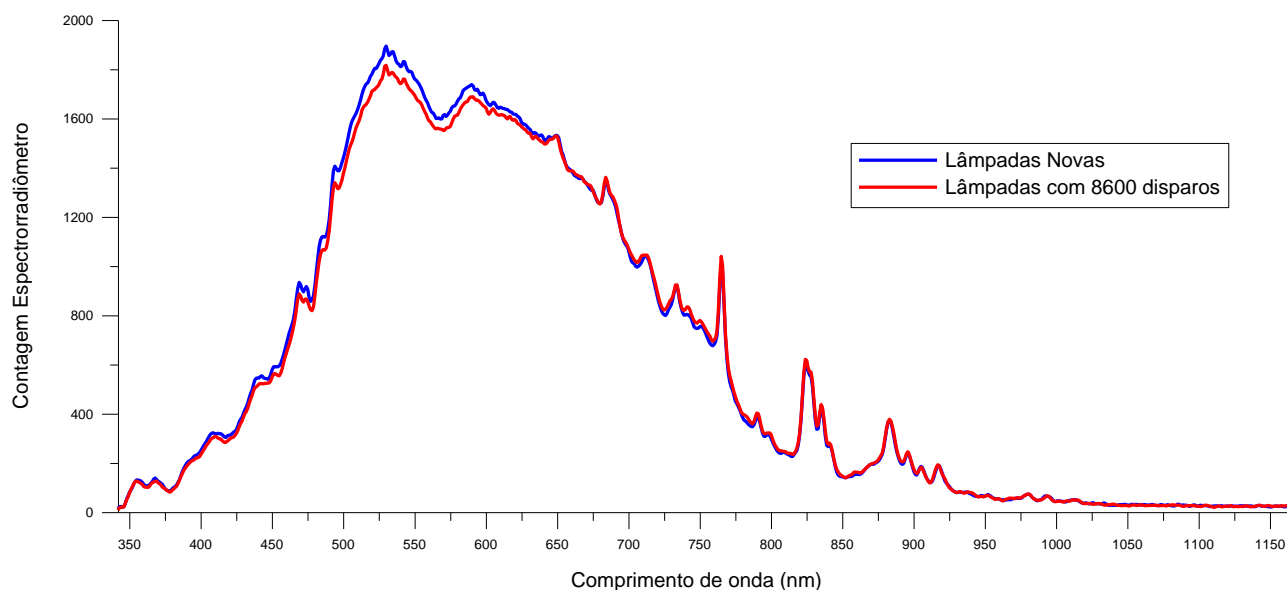


Figura 6 – Medições no simulador sem a aplicação do fator de correção comparando espectro com lâmpadas novas e com lâmpadas com 8600 disparos.

O fator de calibração para cada comprimento de onda foi multiplicado pelo resultado em contagens dos espectros medidos no *flash* do simulador. Os resultados do espectro medido do simulador podem ser vistos no gráfico da Fig. 7. Neste gráfico, também foi adicionado o espectro de referência conforme ASTM G173-03.

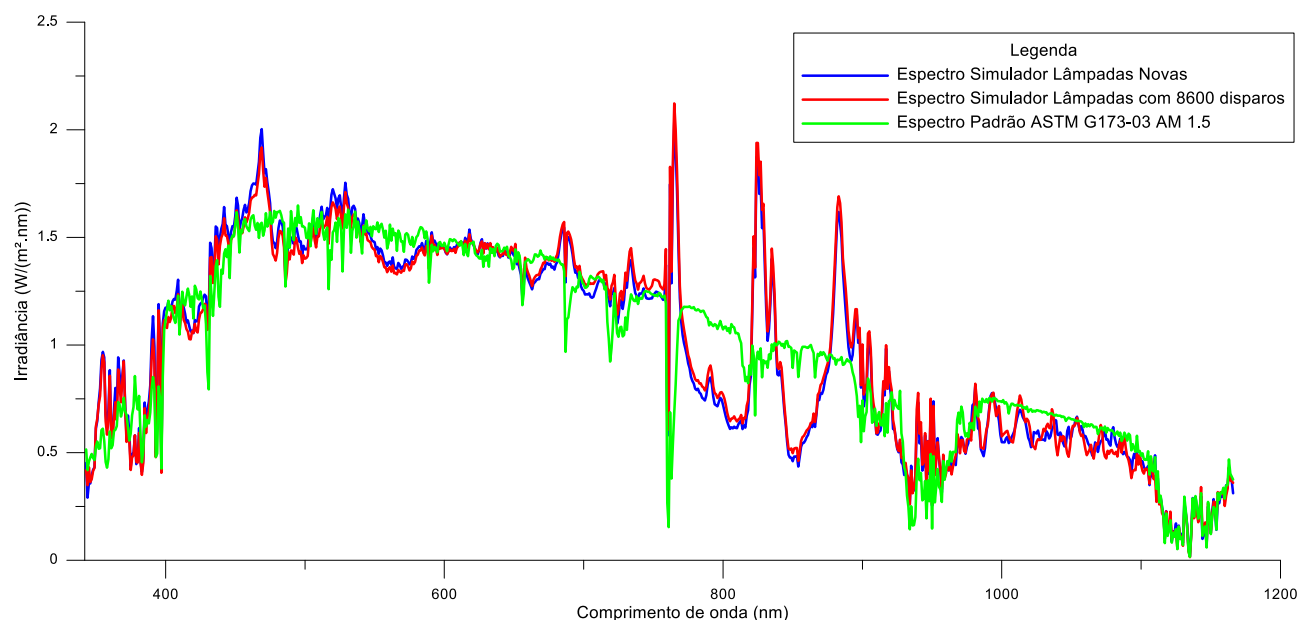


Figura 7 – Resultados dos espectros medidos no simulador, corrigidos com o fator de calibração obtido neste trabalho, e comparação com o espectro padrão para AM 1.5.

**Determinação experimental do fator de descasamento espectral em simulador solar para diferentes tecnologias.** Para avaliar a influência da variação no espectro das lâmpadas do simulador em módulos de diferentes tecnologias, a partir dos espectros do simulador solar medidos e calibrados para as lâmpadas existentes e para as lâmpadas novas, foram realizados cálculos e comparações do fator de descasamento espectral teórico, conforme Eq. (1), utilizando-se as curvas

de resposta espectral de módulo de silício monocristalino (S\_19), módulo a-Si/ $\mu$ Si (DA-141-C1) e módulo de silício amorfo de tripla junção (US-32), com suas respectivas células de referência. Para os módulos de dupla junção e de tripla junção, com o objetivo de identificar qual junção possui o menor valor de corrente e, conseqüentemente, escolher a célula de referência apropriada, foram calculadas as correntes de cada junção conforme a Eq. (3), onde a área do módulo ( $A$ ) é multiplicada pela integral em comprimento de onda do produto da irradiância espectral ( $E$ ) pela resposta espectral ( $SR$ ), onde  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  representam o intervalo onde o módulo solar fotovoltaico apresenta resposta espectral.

$$I_{sc} = A \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} SR(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados experimentais da avaliação do fator de descasamento espectral do simulador.

#### 3.1 Resultados teóricos e experimentais.

Com base nas medições dos espectros do simulador com as lâmpadas novas e com as lâmpadas velhas, com 8600 disparos, e também nas definições da IEC 60904-9, foram calculadas as variações percentuais das lâmpadas do simulador em relação às seis faixas do espectro padrão. Estes resultados são apresentados na Tab. 5.

Tabela 5 – Comparação dos espectros medidos no simulador em relação às definições da IEC 60904-9.

Faixa IEC 60904-9		Integral Espectro Lâmpada Nova (W/m <sup>2</sup> )	Integral Espectro Lâmpada Velha (W/m <sup>2</sup> )	Integral Espectro AM1.5G (W/m <sup>2</sup> )	Percentual Lâmpada Nova x Espectro Padrão (<±25%)	Percentual Lâmpada Velha x Espectro Padrão (<±25%)
1	400-500nm	146,23	141,20	140,91	3,78	0,20
2	500-600nm	152,01	148,65	152,52	-0,34	-2,54
3	700-800nm	142,00	143,32	140,62	0,99	1,92
4	700-800nm	114,64	119,64	114,36	0,24	4,61
5	800-900nm	91,56	96,03	95,44	-4,07	0,62
6	900-1100nm	115,62	116,20	121,52	-4,86	-4,38

Utilizando-se a Eq. (3), a segunda junção do módulo de dupla junção (a-Si/ $\mu$ -Si), que corresponde à célula de referência AK-110, apresentou a menor corrente. Já para o módulo de tripla junção (a-Si/a-Si/a-Si-Ge), foi a junção intermediária, correspondente à célula de referência AK-130, que apresentou a menor corrente. É apresentada na Tab. 6 a influência da variação no espectro, devido à troca das lâmpadas do simulador, no fator de descasamento espectral detrés tipos de módulos de diferentes tecnologias. Os resultados foram obtidos utilizando-se as respostas espectrais das células de referência da Konica Minolta, correspondentes à junção de menor corrente de cada módulo, bem como as respostas espectrais nas quais os módulos apresentaram menor valor de corrente, o espectro padrão AM1.5 e também os espectros medidos no simulador, conforme a Eq. (1).

Tabela 6 – Cálculo do fator de descasamento espectral utilizando os espectros medidos no simulador.

Tecnologias de Módulos utilizadas nos cálculos.	Célula de referência utilizada no cálculo	Descasamento Espectral Lâmpada Nova (%)	Descasamento Espectral Lâmpada Velha (%)
DA-142-C1 (a-Si/ $\mu$ -Si)	AK-110	0,09	-0,18
US-32 (a-Si/a-Si/a-SiGe)	AK-130	-0,90	-1,80
S_19 (c-Si)	AK-200	-0,04	0,03

Muitas vezes, pode ocorrer a necessidade de avaliar a curva característica de um módulo de uma tecnologia sem a correspondente célula de referência. Este procedimento não é recomendado pelas normas da série IEC 61215:2016, mas, mesmo assim, avaliou-se o erro de descasamento para ensaios de dois módulos de filmes finos com a célula de referência de silício monocristalino. O resultado consta na Tab. 7.



Tabela 7 – Avaliação do erro de descasamento para módulos de filmes finos no caso de utilizar célula de referência de silício monocristalino.

Tecnologias de Módulos utilizadas nos cálculos.	Célula de referência utilizada no cálculo	Descasamento Espectral Lâmpada Nova (%)	Descasamento Espectral Lâmpada Velha (%)
DA-142-C1 (a-Si/ $\mu$ Si)	AK-200	2,92	4,53
US-32 (a-Si/a-Si/a-SiGe)	AK-200	1,15	-0,13

Na Tab. 7 são apresentados os valores calculados do fator de descasamento espectral entre módulos de filmes finos, utilizando como referência a célula AK-200 (silício monocristalino). Ressalta-se que neste cálculo foi utilizada a curva de resposta espectral da segunda junção tanto do módulo a-Si/ $\mu$ Si como do módulo a-Si/a-Si/a-SiGe, pois ambas representam as junções com menor valor de corrente.

#### 4. CONCLUSÃO

A calibração do espectrorradiômetro, com base na medição da irradiância direta e posterior comparação com o espectro gerado para o mesmo dia e horário, através de dados de satélites e do programa SMARTS2, mostrou-se adequada para o experimento. Segundo os dados do fabricante do simulador, o casamento espectral nas seis faixas da norma IEC deve estar dentro de  $\pm 12,5$  %, cumprindo com a classificação A+ A+ A+. Com os valores obtidos a partir da medição do espectro do simulador foi possível verificar que os resultados do casamento espectral mostraram-se adequados em todas as faixas de comprimento de onda (Tab. 5).

Percebe-se através da Tab. 6 que, para o módulo DA-142-C1 (a-Si/ $\mu$ Si), a célula de referência AK-110 (correspondente a tecnologia de silício amorfo para junção intermediária) apresenta fatores de descasamento adequados tanto para lâmpadas novas quanto para lâmpadas com 8600 disparos, visto que os valores ficaram em 0,09 % e -0,18 %, respectivamente. Igualmente, o módulo US-32 (a-Si Tripla Junção) teve a célula AK-130 (correspondente a tecnologia de silício amorfo para junção intermediária) condizente para atender ambos os casos, lâmpada nova (-0,90 %) e lâmpada velha (-1,8 %). Do mesmo modo, o módulo de silício monocristalino modelo S\_19, utilizando como referência a célula de referência AK-200 (correspondente à tecnologia de silício monocristalino) apresentou descasamentos coerentes de -0,04 % e 0,03 % para lâmpadas novas e para lâmpadas velhas, respectivamente. Estes valores de descasamento observados indicam um funcionamento adequado do simulador para o teste de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias com as duas configurações de lâmpadas.

Para o caso apresentado na Tab. 7, o módulo de dupla junção apresentou um descasamento de 2,92 % para a lâmpada nova e 4,53 % para a lâmpada velha, enquanto o módulo de tripla junção de silício amorfo apresentou descasamentos de 1,15 % e -0,13 %, respectivamente. Em ambos os casos os resultados demonstram que é muito importante utilizar uma célula de referência de mesma tecnologia do módulo, conforme a própria norma exige. No entanto, pelos valores apresentados para o módulo de tripla junção, observa-se que o uso da célula de referência de silício monocristalino para este módulo seria mais tolerável do que para o módulo de dupla junção.

#### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq.

#### REFERÊNCIAS

- Bühler, A. J.; Krenzinger, A.; Souza, R. Metodologia para determinação do fator de correção espectral de módulos fotovoltaicos de multijunção. **XXXIV Reunión de Trabajo de Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente**. Termas de Río Hondo, Argentina. 2011.
- Galdino, M. A. Estado da arte da tecnologia de simuladores solares. **V Congresso Brasileiro de Energia Solar** – Recife, 31 a 03 de abril de 2014.
- Gasparin, F. P.; Bühler, A. J.; Krenzinger, A. Análise da importância do fator de descasamento espectral na caracterização elétrica de módulos fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energia Solar**. Volume III, Número 2, p.94-101, Dezembro de 2012.

- Haag, R. **Estimativa da distribuição espectral da radiação solar sobre o território brasileiro através de análise multiinstrumental**. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2012.
- Nishikawa, Y.; et al. Irradiance adjustment system developed for various types of solar cells and illumination conditions. **WILEY**. Volume 3, Issue 5, pages 456-467. New Jersey, September, 2015.
- Norma IEC 60904-9:2007. Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements. International Electrotechnical Commission.
- Norma IEC 61215-1:2016. Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements. International Electrotechnical Commission.
- Norma IEC 61215-1-2:2016. Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1-2: Special requirements for testing of thin-film Cadmium Telluride (CdTe) based photovoltaic (PV) modules. International Electrotechnical Commission.
- Norma IEC 61215-1-4:2016. Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1-4: Special requirements for testing of thin-film Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub> based photovoltaic (PV) modules. International Electrotechnical Commission.
- Norma IEC 61215-1-3:2016. Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1-3: Special requirements for testing of thin-film amorphous silicon based photovoltaic (PV) modules. International Electrotechnical Commission.
- Norma IEC 60904-3:2019 RLV. Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data. International Electrotechnical Commission.
- Norma IEC 60904-7:2019 RLV. Photovoltaic devices - Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices. International Electrotechnical Commission.
- Perlin, J. The Silicon Solar Cell Turns 50. **National Renewable Energy Laboratory (NREL)**, Report No. BR-520-33947. August 2004.
- Souza, R.; Prieb, C. W. M.; Krenzinger, A. Análise de Simuladores Solares para ensaios de módulos fotovoltaicos. **IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES** – São Paulo, 18 a 21 de setembro de 2012.
- Tzamalís, G.; Mülljans, H. Calibration of multi-junction (tandem) thin film photovoltaic modules under natural sunlight. **Materials Research Society**. Vol. 1321. Pittsburgh, January 2011.

#### **DETERMINATION OF VARIATION IN IRRADIANCE SPECTRAL DISTRIBUTION OF A SOLAR SIMULATOR WITH REPLACING LAMPS**

**Abstract.** *This work presents an analysis of the irradiance spectrum in a pulsed simulator installed at the UFRGS Solar Energy Laboratory (LABSOL) for 8600-shot lamps as well as for new lamps. A spectroradiometer capable of measuring the spectrum between 342 and 1166 nm is used. This work also presents the spectroradiometer calibration methodology, which is performed by comparing the direct irradiance with spectrum measurements obtained by the SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) radiation transfer model. To use this model, it was necessary to obtain data from satellites and weather stations for the day and time of the measurement performed. By obtaining the simulator spectra, it was possible to calculate and compare the spectral mismatch factors of different technology modules for each lamp configuration. The results showed that the calibration of the spectroradiometer performed made it possible to obtain the spectrum of the pulsed simulator with good quality, since in its comparison with the standard spectrum the result was satisfactory. The spectral mismatch analyzes allowed us to evaluate the impact of simulator lamp aging on the quality of the characterization of different photovoltaic module technologies.*

**Keywords:** *Solar Simulator, Spectral Distribution, Spectral Mismatch*