

ESTADO DA ARTE DA TECNOLOGIA DE SIMULADORES SOLARES

Marco Antonio Galdino – marcoag@cepel.br
Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica; Rio de Janeiro-RJ;

Resumo. O artigo apresenta uma análise descritiva das tecnologias atualmente empregadas nos simuladores solares para o ensaio de módulos fotovoltaicos. São apresentadas as formas de operação dos simuladores solares, bem como as características das fontes de luz neles empregadas, incluindo considerações sobre a distribuição espectral das lâmpadas utilizadas, sua durabilidade e seu consumo de energia. Os requisitos e a classificação de desempenho para os simuladores são também discutidos, com base nas especificações das normas IEC pertinentes. A análise das características dos equipamentos disponíveis comercialmente é feita com base nos levantamentos da publicação Photon International. Como conclusão, são apresentadas recomendações sobre as especificações consideradas mais adequadas para simuladores solares no estado da arte da tecnologia.

Palavras-chave: Simuladores solares; Lâmpadas para simuladores solares; Ensaio de módulos fotovoltaicos

1. INTRODUÇÃO

O presente artigo aborda as características e especificações de simuladores solares destinados à determinação da potência máxima (Wp) de módulos fotovoltaicos, de acordo com as normas IEC 61215 (2005) e IEC 61646 (2008), bem como ao traçado de suas curvas I-V.

Tais equipamentos simuladores solares utilizam lâmpadas especiais como fontes de luz para simular a radiação solar dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma IEC 60904-3 (2008), que define as STC (*standard test conditions*), condições padrão para o teste de módulos fotovoltaicos:

- Irradiância de 1000 W/m^2
- Distribuição espectral da irradiância AM1,5
- Temperatura das células fotovoltaicas de 25°C

O gráfico da Fig. 1 apresenta a distribuição espectral denominada AM1,5, em comparação com o espectro AM0. As STC são também definidas na normatização brasileira ABNT NBR 10899 (2006).

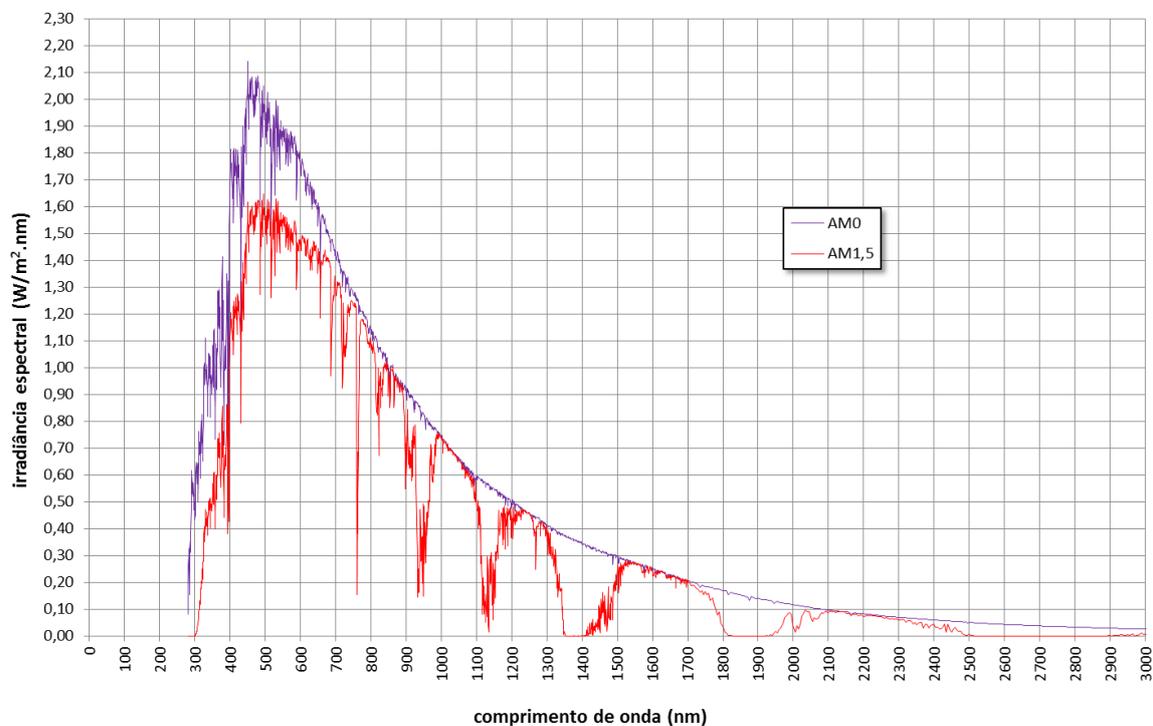


Figura 1 – Distribuições espectrais AM0 (radiação extraterrestre) e AM1,5 de acordo com normas internacionais

Além das medidas nas STC, as normas IEC 61215 (2005) e IEC 61646 (2008) também especificam um ensaio para módulos em condições de baixa irradiância (*performance at low irradiance* – item 10.7 das normas), de 200 W/m^2 ,

mantidas as demais condições das STC. Adicionalmente, as mesmas normas especificam ainda um terceiro teste (*performance at NOCT* – item 10.6 das normas), com uma irradiância de 800 W/m^2 , estando o módulo na temperatura denominada NOCT (*normal operating conditions temperature*), temperatura esta, por sua vez, determinada através de um outro ensaio especificado nas mesmas normas (*measurement of NOCT* –item 10.5 das normas, feito por meio de um teste *outdoors*).

O simulador pode também ser usado para medir os coeficientes de temperatura de módulos fotovoltaicos, outra vez conforme os procedimentos especificados nas normas IEC 61215 (2005) e IEC 61646 (2008) (*measurement of temperature coefficients* – item 10.4).

Para a preparação do presente trabalho, foram consultados 6 levantamentos (*surveys*) sobre o mercado de simuladores solares veiculados no período de 2008 a 2013 pela publicação *Photon International Magazine*, em particular o último *survey*, datado de jun/13 (Photon, 2013), no qual são apresentados 81 modelos de equipamentos, de 17 diferentes fabricantes, provenientes de 9 países, conforme resume a Tab. 1.

Tabela 1 – Levantamento de simuladores solares (Photon, 2013)

Fabricante	Nacionalidade	Número de modelos
Aescusoft GmbH Automation	Alemanha	3
All Real Technology Co. Ltd.	Taiwan	5
Berger Lichttechnik GmbH & Co. KG	Alemanha	7
Ecoprogetti Srl	Itália	2
EETS – Energy Equipment Testing Services Ltd.	Inglaterra	6
Endeas Oy	Finlândia	10
H.A.L.M. Elektronik GmbH	Alemanha	4
Iwasaki Electric Co. Ltd.	Japão	3
Nisshinbo Industries Inc.	Japão	5
Optosolar GmbH	Alemanha	9
Pasan SA	Suíça	2
PSE AG	Alemanha	3
Rising Solar Equipment Co. Ltd	China	1
Solaronix SA	Suíça	12
Sinton Consulting Inc.	EUA	1
Spire Solar Inc.	EUA	7
Baixin Machinery Co. Ltd	China	1
	Total	81

Para fins do presente trabalho, os simuladores serão classificados a partir de três características: forma de operação, tipo de fonte de luz e forma de montagem, conforme detalhado nos itens 2 a 4 a seguir.

2. FORMAS DE OPERAÇÃO DE SIMULADORES SOLARES

São três as formas de operação dos simuladores solares: contínuo (*steady state*), multipulsos (*multi flash*) e monopulso (*single flash*), conforme ilustrado na Fig. 1.

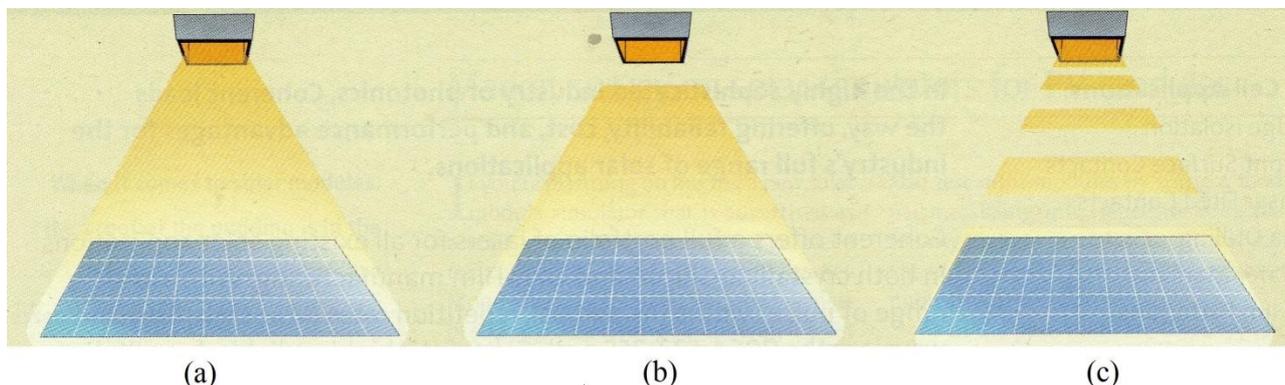


Figura 2 – Formas de operação dos simuladores solares: (a) contínuo, (b) monopulso e (c) multipulso (Photon, 2008).

A Tab. 2 mostra a distribuição das formas de operação entre os produtos disponíveis comercialmente segundo o survey supracitado, publicado em jun/13. Os totais de “fabricantes” e “modelos” da Tab. 2 não coincidem com os da Tab. 1. Isto se dá porque um dos fornecedores (All Real Technology) oferece modelos de duas formas de operação: monopulso e contínuo, enquanto que outro fabricante (Optosolar) oferece modelos monopulso com opcional de multipulso, de forma que estes casos foram contabilizados na Tab. 2 em duas classes.

Tabela 2 – Disponibilidade de equipamentos segundo a sua forma de operação (Photon, 2013)

	monopulso	contínuo	multipulsos
modelos	55	25	10
fabricantes	13	4	2

2.1 Simuladores contínuos

Os simuladores do tipo contínuo utilizam uma fonte de luz fixa para a medida da curva I-V do módulo fotovoltaico, o que, portanto, pode ser feito de forma contínua, com baixa taxa de aquisição de dados e com precisão bastante elevada. Este tipo de equipamento apresenta custo inicial bastante elevado e custo operacional também elevado, devido a seu alto consumo de energia e à baixa durabilidade das lâmpadas.

Tratam-se de instalações de grande porte, que podem requerer inclusive sistemas auxiliares para refrigeração da fonte de luz e/ou do módulo sob teste, de forma a mantê-lo na temperatura de 25°C, especificada pelas condições padrão de teste (STC).

Este tipo de simulador tem como vantagem permitir investigar os efeitos de degradação induzida pela luz em módulos fotovoltaicos de filmes finos. Este fenômeno, conhecido como efeito Staebler-Wronski, pode ocorrer, por exemplo, em módulos de a-Si (Silício amorfo) em seus primeiros meses de operação. Devido a isso, a norma IEC 61646 (2008), referente ao ensaio deste tipo de módulo, especifica uma etapa de exposição do módulo à irradiância na faixa de 600-1000 W/m² até a estabilização de sua potência máxima, num processo denominado de *light soaking* (item 10.19 da norma). Isto pode ser feito com auxílio de um simulador do tipo contínuo, que assume para isso a função de um *light soaking device*, embora, este, a rigor, possa ser um equipamento com especificações inferiores. A norma admite que o *light soaking* seja também feito por exposição à radiação solar natural (*outdoors*), embora, neste caso, obviamente, o processo não possa ser controlado.

2.2 Simuladores multipulso

Os simuladores multipulsos emitem uma sequência de pulsos de luz de curta duração, durante os quais são medidos pontos individuais da curva I-V. As medidas feitas com equipamentos que adotam este tipo de tecnologia são consideradas as menos precisas.

Conforme a Tab. 2, no momento apenas 2 fabricantes oferecem este tipo de equipamento para comercialização, sendo que um deles (Optosolar GmbH) apenas como uma forma de operação opcional em 9 modelos de simuladores que normalmente operam de forma monopulso. Portanto, na verdade, consta no último *survey* apenas um fornecedor (Sinton Consulting Inc.) com um modelo de equipamento que opera exclusivamente na forma multipulso.

A companhia Spire Corp., por exemplo, ofereceu equipamentos multipulso nos levantamentos até (Photon, 2010), contudo, nos levantamentos subsequentes até (Photon, 2013), passou a fornecer somente equipamentos de operação monopulso.

2.3 Simuladores monopulso

Os simuladores do tipo monopulso efetuam a medida de todos os pontos da curva I-V durante um pulso único de luz. Nesta tecnologia, a medida da curva I-V exige uma eletrônica de aquisição bastante rápida, de forma a não incorrer em erros. Não existem problemas relativos à temperatura, pois os módulos não chegam a aquecer durante a medida, além disso, o consumo de energia é baixo.

A duração do pulso varia de duas ordens de grandeza, dependendo do fabricante. Os mais curtos são de 2ms (Aescusoft), enquanto que os mais longos atingem mais de 130ms (Spire). Alguns valores frequentes são 10ms, 20ms, 50ms e 100ms.

Em princípio, pulsos mais longos, da ordem de 100ms, se destinam a medidas de módulos de filmes finos, multijunção, heterojunção e módulos de c-Si (Silício cristalino) de alta eficiência, enquanto que os módulos de c-Si convencionais podem ser testados com pulsos da ordem de 10ms, ou menos.

Por outro lado, sabe-se que para pulsos curtos (10ms ou menos), a capacitância das células pode influir nos resultados, por isso são necessários algoritmos computacionais especiais para efetuar as medidas nessas condições e alguns fabricantes (Optosolar GmbH, Pasan SA, Sinton Consulting Inc., Berger Lichttechnik) alegam possuir soluções próprias de bastante precisão para contornar este problema, sendo que, ao menos em um dos casos, trata-se de solução inclusive patenteada (Sinton Consulting).

Atualmente a tecnologia monopulso domina o mercado. A maioria dos fabricantes comercializa este tipo de equipamento, que é o mais utilizado, tanto em laboratórios quanto nas linhas de produção de módulos fotovoltaicos. Na Tab. 2 observa-se que são disponíveis 55 modelos, oferecidos por 13 diferentes fabricantes.

3. FONTES DE LUZ PARA SIMULADORES SOLARES

Cinco fontes de luz estão sendo usadas atualmente nos simuladores solares: lâmpadas de Xenônio (Xe), lâmpadas halógenas, lâmpadas de vapores metálicos ou multivapores metálicos (denominadas em língua inglesa de *metal halide*

lamps ou de HMI–*hydragyrum medium-arc iodide*), LEDs (*light emitting diodes*) e lâmpadas de plasma. Cada uma destas fontes luminosas tem vantagens e desvantagens em relação à distribuição espectral, durabilidade da lâmpada e consumo, conforme discutido a seguir.

Cabe aqui lembrar que nos simuladores solares as lâmpadas são alimentadas por fontes eletrônicas c.c. (operando de forma pulsada, para os simuladores não-contínuos) de alta precisão, de forma a assegurar a necessária estabilidade temporal da irradiância, ao contrário de aplicações em iluminação convencional onde normalmente operam em c.a.

A principal consideração relativa à utilização de determinado tipo de lâmpada num simulador solar é a distribuição espectral de sua irradiância, a qual, conforme já mencionado, deve ser a mais próxima possível do espectro solar padrão AM1,5, sendo que a norma IEC 60904-9 (2007) especifica o procedimento para avaliar a distribuição espectral de determinado simulador, conforme apresentado no item 5 deste artigo.

A durabilidade das lâmpadas, por sua vez, é outro item relevante nos simuladores usados em linhas de produção de módulos fotovoltaicos, mas não tanto naqueles usados em laboratórios. Neste aspecto, para as lâmpadas usadas em iluminação convencional, os catálogos e *datasheets* dos fabricantes especificam sua durabilidade em horas de operação contínua ou ciclada de acordo com as normas padronizadas para ensaios de iluminação (normalmente para alimentação em c.a.). Estes dados, em princípio, não se aplicam diretamente nem aos simuladores contínuos, e, obviamente, nem para aqueles que operam de forma pulsada, portanto, depende-se das informações de durabilidade disponibilizadas por seus fabricantes. No caso dos simuladores que operam de forma pulsada, a vida útil é normalmente informada em número de pulsos.

O consumo dos simuladores depende da forma de operação e do tipo de lâmpada. Os dados de consumo divulgados pelos fabricantes nos *surveys* da publicação *Photon International* não foram considerados confiáveis. Por isso, para avaliar a eficiência energética dos equipamentos calculou-se, como um indicador básico, apenas a densidade de potência instalada por área (kW/m^2), considerando para isso os dados de potência declarada pelo fabricante e a área de teste.

A Tab. 3 mostra a distribuição dos produtos disponíveis, em relação ao tipo de lâmpada adotado. Os totais de “fabricantes” e “modelos” da Tab. 3 não coincidem com os da Tab. 1. Isto ocorre porque um dos fornecedores (Nisshimbo) oferece um modelo “híbrido”, o qual usa simultaneamente dois tipos de lâmpadas: Xe e halógena, tendo sido este fornecedor/modelo contabilizado nas duas classes.

Tabela 3 – distribuição dos tipos de lâmpadas nos simuladores disponíveis no mercado (Photon, 2013)

	Xe	halógena	vapores metálicos	plasma	LED
modelos	58	7	3	12	2
fabricantes	13	2	1	1	1

3.1 Lâmpadas halógenas

As lâmpadas halógenas são lâmpadas incandescentes, ou seja, possuem um filamento de Tungstênio levado à incandescência pela passagem da corrente elétrica, porém, no interior do bulbo possuem, além do Argônio (Ar) um gás em alta pressão de um elemento halogênio da tabela periódica, normalmente o Iodo ou o Bromo (I_2 ou Br_2), o que permite que o filamento opere em uma temperatura mais elevada e resulta em algumas vantagens frente às incandescentes convencionais. As principais vantagens são uma luz mais branca (maior temperatura de cor), melhor eficiência energética (atinge 25 lm/W) e maior durabilidade.

As lâmpadas halógenas tem espectro de emissão semelhante ao de um corpo negro na temperatura de operação do filamento, que, no caso, pode atingir os 3400°C . Tal espectro terá então, o pico na região do infravermelho (IR), que corresponde a comprimentos de onda superiores a 780nm, e, para que atenda ao padrão AM1,5, é necessário efetuar uma filtragem óptica nesta região do IR (são apresentados mais detalhes sobre esta filtragem no item 3.4).

Os dados do levantamento mostram que tais lâmpadas são adotadas atualmente somente por um fabricante (EETS) de simuladores solares, o qual fornece uma família de equipamentos com operação do tipo contínuo, disponível no mercado desde 2008 (Photon, 2008). A durabilidade declarada da lâmpada é de 2.000h, 3.000h ou 5.000h, dependendo do modelo. A densidade de potência média dos 6 modelos deste fabricante atinge 8kW/m^2 .

3.2 Lâmpadas de vapores metálicos

As lâmpadas de vapores metálicos são classificadas como lâmpadas de descarga, nas quais a emissão luminosa é produzida direta ou indiretamente por um arco elétrico no interior de um bulbo contendo um gás, mistura de gases ou vapores. No caso, tratam-se de vapores em alta pressão de Mercúrio (Hg) e de um elemento halogênio (I ou B), associados a outros elementos, como Sódio (Na) Tálcio (Tl) e Índio (In), entre outros, sendo que a composição química adotada para a mistura determina o espectro de emissão.

Segundo (Photon, 2013), as lâmpadas de vapores metálicos usadas nos simuladores solares tem uma excelente distribuição espectral da irradiância, atendendo ao espectro padrão AM1,5 em comprimentos de onda longos, de até 3.000nm (região do IR), muito embora a norma IEC 60904-9 (2007) só considere a faixa até 1.100nm. Além disso, sabe-se que estas lâmpadas tem ainda alta eficiência energética (é a fonte de luz branca mais eficiente disponível no mercado – $\sim 100\text{lm/W}$), o que resulta em menor consumo de energia.

Segundo os *datasheets* de seus fabricantes, as lâmpadas de vapores metálicos necessitam de um tempo de ~2min para evaporação e ionização dos componentes da mistura quando então atingem irradiância e espectro de emissão nominais, de forma que tais lâmpadas, portanto, não se aplicam à forma de operação pulsada em simuladores solares.

Apesar das vantagens citadas, na área de simuladores solares, seu uso está atualmente restrito também a apenas um fabricante (PSE AG), introduzido no mercado em 2011 (Photon, 2011), que disponibiliza atualmente 3 equipamentos de operação em forma contínua. O fabricante declara que a durabilidade da lâmpada é de apenas ~1000h. A densidade de potência média para os 3 modelos deste fabricante, de $0,92\text{kW/m}^2$, é a menor dentre todos os modelos de lâmpadas.

Não é demasiado lembrar que, por conterem Hg, as lâmpadas de vapores metálicos são classificadas pela legislação ambiental brasileira como resíduos perigosos, requerendo assim cuidados especiais para manuseio, armazenamento, transporte e descarte.

3.3 LEDs

Os LEDs são dispositivos semicondutores que emitem luz pelo princípio físico da recombinação irradiante. Segundo este princípio, portadores de carga gerados eletricamente (elétrons e lacunas) se recombinam no interior do material, sendo a energia do elétron convertida por meio deste processo em um fóton de comprimento de onda correspondente.

Os LEDs são onnipresentes atualmente, sendo usados em aplicações como telas de TV e monitores de computador, semáforos e equipamentos de controle remoto, entre muitas outras. No mercado de iluminação os LEDs foram introduzidos há alguns anos e a maioria dos grandes fabricantes do setor já disponibiliza este tipo de produto, cuja eficiência energética pode ser superior a 75 lm/W . Vários fabricantes já anunciaram o desenvolvimento de LEDs brancos com eficiência de 200 lm/W e as expectativas são de que estes entrem no mercado em 2015.

O LED emite luz de uma banda de cor bastante estreita, que depende do material semicondutor utilizado. Para obter-se a luz branca são utilizadas duas abordagens:

- uma combinação de LEDs de diferentes materiais que emitem, por exemplo, nas cores azul, vermelho e verde (RGB LED); em proporções específicas;
- uma emissão azul (ou mesmo UV) com o interior do LED revestido com um fósforo (combinação de substâncias) que absorve o azul e reemite em outros comprimentos de onda, resultando na cor branca.

No caso dos simuladores solares, para cobrir-se toda a distribuição espectral exigida, deve-se utilizar simultaneamente diversos tipos de LEDs. Segundo afirmação de um especialista citado em (Photon, 2011), seriam necessários 18 a 20 tipos de LEDs para cobrir todo o espectro AM1,5. Contudo, os LEDs disponíveis para iluminação em geral são fabricados somente na faixa da luz visível (380nm-780nm) e, ainda segundo este especialista, não existe disponibilidade de LEDs para comprimentos de onda superiores a 800nm (região IR). Não concordamos com esta afirmação, pois sabe-se que são produzidos LEDs IR para aplicações como equipamentos de controle remoto e iluminação noturna em sistemas de segurança.

Nos 6 levantamentos de mercado de simuladores solares usados como referência para o presente trabalho, a empresa Strama Maschinenbau GmbH & Co (Alemanha) foi a primeira a oferecer um equipamento a LED, um simulador contínuo, em 2009 (Photon, 2009). Na época, a empresa alegava que sua solução estava em processo de patente, contudo, o equipamento/fabricante não apareceu em nenhum dos levantamentos subsequentes. A companhia Wacom Electric Co, Ltd. (Japão), por sua vez, também introduziu um simulador monopulso a LED em 2012 (Photon, 2012), mas não voltou a aparecer no levantamento de 2013.

Este último levantamento (Photon, 2013) mostra apenas um fabricante (Ecoprogetti) adotando LEDs e comercializando dois modelos de equipamentos simuladores de operação monopulso. O equipamento foi lançado no ano de 2011 (Photon, 2011) e opera com 6 diferentes tipos de LEDs. Apesar de classificado como monopulso, trata-se de pulsos de longa duração, de 200ms a 10s, muito superiores, portanto, àqueles adotados nas lâmpadas de Xe (ver item 3.4). A durabilidade dos LEDs seria de 10.000.000 de pulsos, de acordo com o declarado pelo fabricante, o que representa reduzidos custos de manutenção. Entendemos que, em princípio, este simulador poderia também ser operado de forma contínua, o que é uma vantagem deste tipo de fonte de luz. A densidade de potência destes dois modelos a LEDs é de surpreendentes $8,75\text{kW/m}^2$, superior inclusive à das lâmpadas halógenas.

Segundo (Photon, 2011), caso a tecnologia de LEDs realmente se mostrar adequada aos simuladores solares, então o número de fabricantes para este tipo de equipamento poderá explodir. Concordamos com a afirmação, e entendemos que este momento, embora ainda não tenha chegado, poderá chegar a curto/médio prazo. Segundo especialistas na área de iluminação, os LEDs ou os OLEDs (*organic* LEDs) tem potencial de suplantarem no futuro todas as demais fontes de luz atualmente usadas pela humanidade, em termos de eficiência e flexibilidade de adaptação às diferentes aplicações.

3.4 Lâmpadas de Xenônio

As lâmpadas de Xe também são lâmpadas de descarga, nas quais o bulbo contém o gás nobre Xenônio a alta pressão. Este tipo de lâmpada não é utilizado em iluminação convencional, mas somente em aplicações especiais, como, por exemplo, a projeção de cinema e os faróis automotivos.

Elas também apresentam boa resposta espectral para simuladores solares uma vez que seus picos de emissão na região do IR, na qual a absorção do Si é significativa, sejam eliminados por meio dos filtros ópticos apropriados

(Fig. 3), similares aos necessários para as lâmpadas halógenas. A filtragem é baseada em interferência destrutiva e implementada por meio de diversas camadas superpostas de elementos inorgânicos de diferentes índices de refração. Isso pode ser feito diretamente sobre a lâmpada ou em algum elemento óptico externo.

À guisa de exemplo, a companhia Pasan SA afirmava, em (Photon, 2009), ter desenvolvido para isso um filtro óptico interferencial próprio utilizando cerca de 20 diferentes camadas de filmes finos. Contudo, posteriormente, em (Photon, 2010), a mesma companhia declarava já ter desenvolvido sua própria lâmpada de Xe, revestida por 40 camadas de filmes finos. O fabricante Berger Lichttechnik, por sua vez, alega ter uma tecnologia de filtragem óptica patenteada.

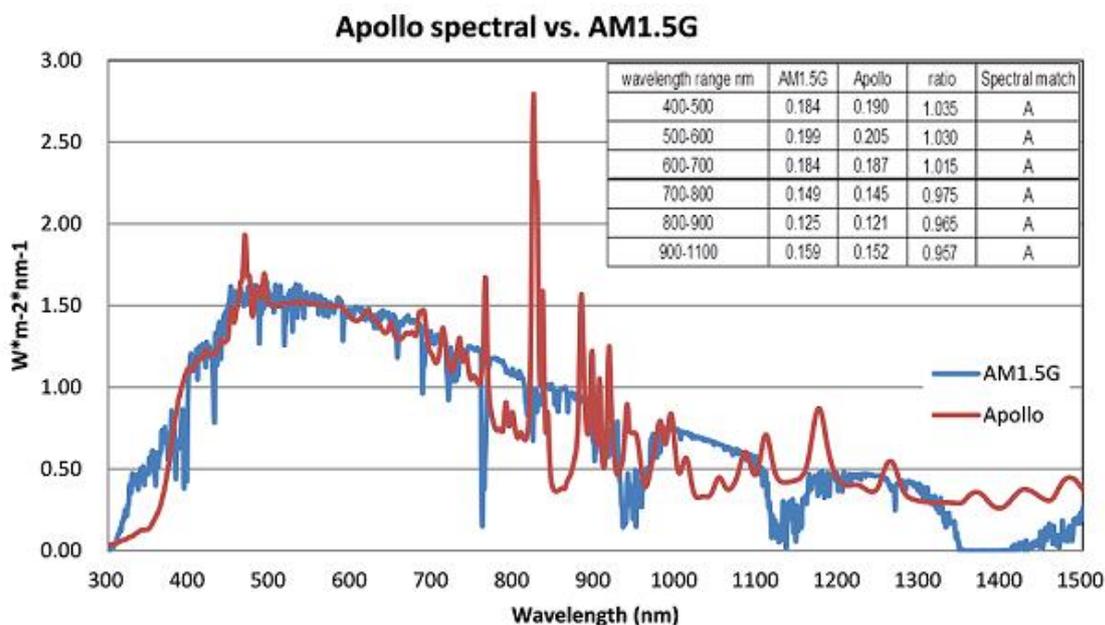


Figura 3 – Superposição do espectro padrão AM1,5 (linha na cor azul) com o espectro de emissão de uma lâmpada de Xe já corrigido por filtros ópticos (linha vermelha) (Fonte: (All Real Technology, 2013))

De qualquer forma, a lâmpada de Xe é, sem dúvida, atualmente a mais usada nos simuladores solares. Na Tabela III vemos 58 produtos, oferecidos por 13 fabricantes. Apenas um destes fabricantes (All Real Technology) utiliza lâmpadas de Xe para um simulador contínuo, todos os demais são de operação pulsada (monopulso).

As durações dos pulsos já foram discutidas no item 2.3. Quanto à durabilidade destas lâmpadas em operação pulsada, declaradas pelos fabricantes dos simuladores, também apresentam variação de ordens de grandeza, de um mínimo de 3.000 pulsos a um máximo de 500.000 pulsos (o fabricante Rising declara uma durabilidade de 3.000.000 de pulsos, valor este considerado irreal, por isso descartado). Valores de 50.000 a 100.000 pulsos são comuns. A densidade de potência média para todos os modelos de todos os fabricantes que operam lâmpadas de Xe de forma pulsada é de 1,47kW/m².

A durabilidade das lâmpadas de Xe em operação contínua, para os 4 modelos do fabricante All Real Technology, é de 1.000-1.500h, enquanto que sua densidade de potência média é de ~21kW/m², valor este extremamente elevado.

3.5 Lâmpadas de plasma

As lâmpadas de plasma (em língua inglesa, são também chamadas de *electrodeless discharge lamp*, ou ainda de *sulphur microwave lamp*) são lâmpadas especiais, não disponíveis para aplicação em iluminação convencional. Trata-se de lâmpadas de descarga sem eletrodos, nas quais o gás contido no bulbo é excitado por meio de radiofrequência (RF) na faixa de 2,45MHz (microondas), ao invés de um arco elétrico entre os eletrodos, como ocorre nas lâmpadas de descarga convencionais. A RF para isso é gerada por meio de uma válvula magnétron, usando tecnologia análoga a um forno de microondas, o que faz com que o custo da fonte de alimentação para a lâmpada seja significativo. A lâmpada em si é apenas um bulbo contendo em seu interior um gás composto por Enxofre (S) e Argônio (Ar).

A lâmpada de plasma tem alta eficiência luminosa, podendo atingir 110 lm/W, e sua vida útil é bastante elevada, podendo chegar a 60.000h. A limitação da vida útil é na verdade devida ao magnétron, que tem vida útil bastante inferior (~15.000h) à da lâmpada. A lâmpada de plasma também apresenta um retardo de ~30s desde sua energização até que atinja sua emissão nominal, de forma que não se aplica para simuladores pulsados.

Apenas o fabricante Solaronix SA (Suíça) adota a tecnologia de lâmpadas de plasma em simuladores solares. Trata-se de uma linha de produtos com operação de forma contínua, que permanece no mercado desde 2008 e conta com 12 diferentes modelos em 2013. Segundo o fabricante (Photon, 2010), este tipo de lâmpada não requer uma filtragem óptica complexa para atingir o espectro AM1,5 e sua durabilidade é de 20.000h (um dos 12 modelos tem durabilidade de 10.000h enquanto que a os demais é de 20.000h), que é a maior durabilidade entre os modelos de

simuladores contínuos constando dos surveys. O conjunto denominado Lumixo, formado pela lâmpada, respectiva fonte de alimentação RF, refletor e outros equipamentos auxiliares, é de projeto e fabricação da própria empresa Solaronix. A densidade de potência média destes simuladores é de $6,78\text{kW/m}^2$.

4. FORMAS DE MONTAGEM DE SIMULADORES SOLARES

As 3 formas de montagem de simuladores solares são: Câmara Escura, Torre e Horizontal. Tais formas de montagem, em princípio, se aplicam principalmente aos simuladores pulsados.

A montagem na Câmara Escura (Fig. 4), também chamada de montagem em túnel, é considerada a forma mais adequada para se alcançar uma boa uniformidade da irradiância em grandes áreas de teste. Nesta montagem o módulo é testado na posição vertical.

A desvantagem aqui é a área ocupada pelos simuladores de Câmara Escura. A título de exemplo, o modelo do fabricante Pasan SA de Câmara Escura com área de teste de $3\text{m} \times 3\text{m}$ tem túnel de 8m de comprimento, enquanto que para a área de $2\text{m} \times 2\text{m}$ o comprimento do túnel é de $5,5\text{m}$.

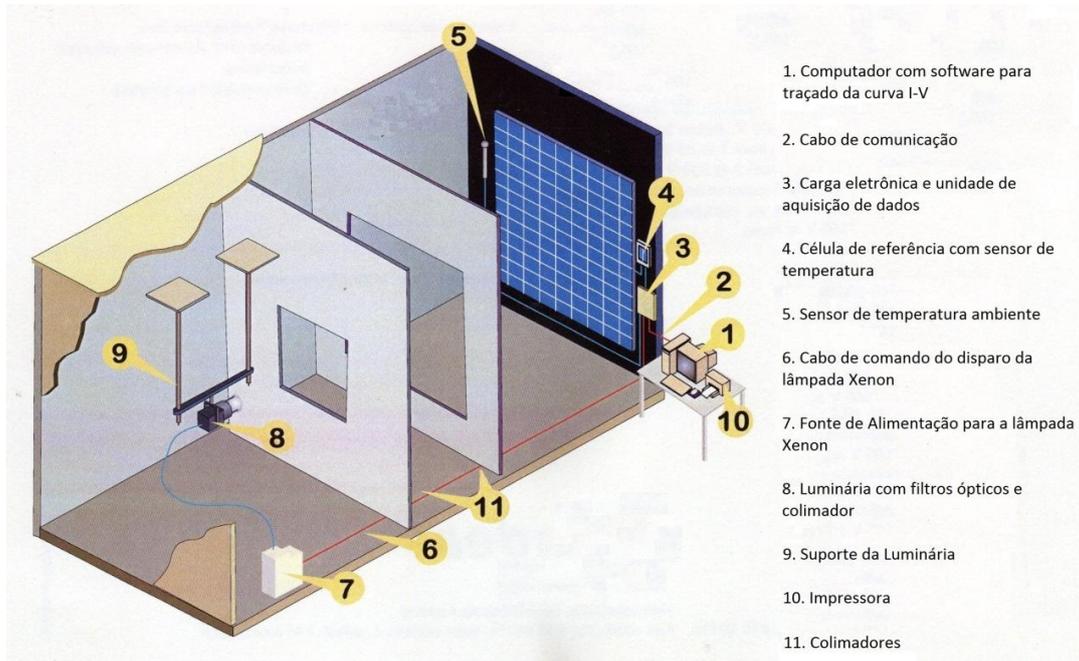


Figura 4 – Simulador de Câmara Escura (Adaptado de (Endeas,2004))

A montagem em torre (Fig. 5) normalmente se aplica a áreas de teste menores.

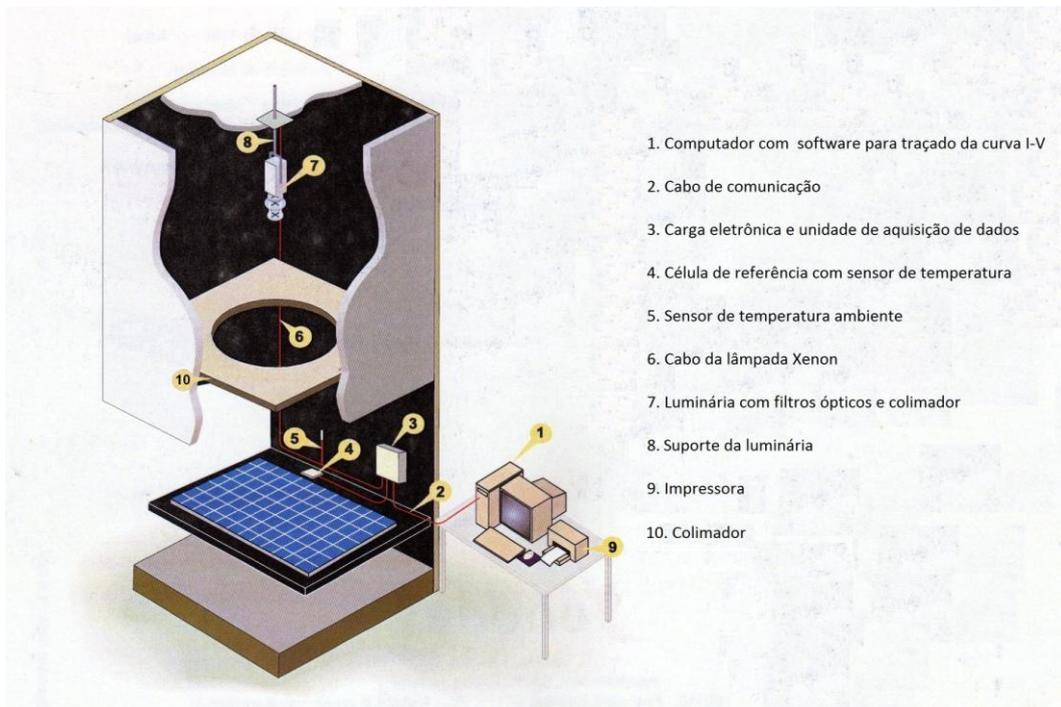


Figura 5 – Simulador do tipo torre (Adaptado de (Endeas, 2004))

A montagem Horizontal (Fig. 6) proporciona equipamentos mais compactos e parece ser a preferida nas linhas de produção da indústria fotovoltaica.



Figura 6 – Simulador Horizontal (Photon, 2011)

5. DESEMPENHO DE SIMULADORES SOLARES

Os 3 indicadores de desempenho de simuladores solares especificados pela norma IEC 60904-9 (2007) são os seguintes:

- **Resposta Espectral** – indica o desvio espectral da irradiância do simulador em relação ao padrão AM1,5;
- **Uniformidade** – indica a variação percentual máxima da irradiância na área de teste;
- **Estabilidade** – indica a variação temporal máxima da irradiância durante o período de aquisição da curva I-V.

A referida norma especifica classes designadas pelas letras A, B e C para cada um destes parâmetros, de acordo com a Tab. 4. Às três classes especificadas na norma, por iniciativa do próprio mercado (fabricantes) foi adicionada uma quarta classe extra-oficial denominada A+, representando o dobro da exigência da classe A, que surgiu nos levantamentos a partir do ano de 2011 (Photon, 2011).

Tabela 4 – classes de simuladores de acordo com a norma IEC 60904-9 (2008), sendo mostrada somente a especificação da estabilidade temporal a longo prazo (*long term*)

	C	B	A	A+
Resposta espectral	0,4-2,0%	0,6-1,4%	0,75-1,25%	0,875-1,125%
Uniformidade	10%	5%	2%	1%
Estabilidade Temporal	10%	5%	2%	1%

Assim sendo, a classificação dos simuladores é feita por siglas de 3 letras, resultando em combinações como ABA, ABC, CBA etc, e indicando sua classe em relação aos três parâmetros avaliados, na ordem em que aparecem na Tab. 4. Os melhores simuladores são, portanto, designados por A+A+A+.

A resposta espectral é calculada na faixa de comprimentos de onda de 400nm a 1100nm, subdivida, para este fim, em 6 bandas, através da razão entre a porcentagem de radiação do espectro solar e do espectro do simulador em cada uma destas bandas. A classificação do equipamento neste quesito corresponde à pior classificação obtida entre estas 6 sub-bandas. A Fig. 2, contida no item 3.4, mostra a resposta espectral de um equipamento do fabricante All Real Technology (classe A), sua distribuição percentual nestas 6 bandas, assim como a sua classificação para cada banda.

A estabilidade temporal é definida por dois parâmetros: estabilidade de curto prazo (*short term*) e de longo prazo (*long term*), calculados conforme especificado na norma IEC 60904-9 (2007) e a classificação aplicada ao simulador é também a obtida no pior dos dois casos.

A Tab. 5 mostra um resumo do desempenho dos equipamentos constantes no levantamento (Photon, 2013). Deve-se sempre lembrar que tais dados de desempenho são declarados pelos fabricantes, e que apenas uma parcela deles é efetivamente certificada por laboratórios reconhecidos independentes como, por exemplo, o laboratório TÜV, que atua nesta área. Na Tab. 5, para os casos em que o fabricante oferece opções de mais de uma classe para um determinado modelo de equipamento, foi considerada sempre a classe mais elevada.

Tabela 5 – Desempenho dos equipamentos disponíveis comercialmente (Photon, 2013)

	A+A+A+	A+AA	AAA	outras
modelos	13	9	42	17
fabricantes	5	1	13	8

Observa-se que cerca de metade (42) dos simuladores é de classe AAA, e que 13 deles atingem a classe A+A+A+. Os 9 modelos da classe A+AA correspondem a um único fabricante (Optosolar), que a oferece como opcional a equipamentos originalmente da classe AAA.

Constata-se, porém, que quando a classe A+A+A+ foi introduzida nos levantamentos em 2011, apenas equipamentos do fabricante Pasan SA atendiam a esta classe, mas agora em 2013 outros 4 fabricantes (Berger

Lichttechnik GmbH & co KG, Endeas Oy, H.A.L.M. Elektronik GmbH e Spire Solar Inc.) também já tingiram a mesma classificação, o que, sem dúvida, representa uma evolução técnica significativa no setor.

6. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Uma característica considerada desejável nos simuladores solares é uma carga eletrônica capaz de operar em 3 quadrantes, possibilitando assim traçar a curva I-V reversa no escuro (denominada *dark I-V curve*), o que permite uma caracterização adicional do módulo em teste.

A Eletroluminescência (EL) é uma técnica que permite a detecção de diversos tipos de problemas em módulos fotovoltaicos, como microtrincas (*microcracks*), defeitos na metalização e defeitos nas soldas, entre outros. A técnica se baseia num princípio simples: a polarização direta do módulo no escuro com uma fonte de tensão externa e a detecção da imagem da luz emitida por ele através de uma câmara especial de alta sensibilidade e alta resolução. Esta câmara é o principal componente do sistema EL. Neste tipo de teste, o módulo fotovoltaico funciona como um conjunto de diodos em série, condições nas quais o módulo de c-Si emite luz de baixíssima intensidade na faixa de 950nm a 1250nm (IR) devido à recombinação irradiante. Alguns fabricantes já oferecem há algum tempo equipamentos de EL integrados a seus simuladores solares (Photon, 2011), tanto de operação pulsada (Berger Lichttechnik) quanto de operação contínua (Solaronix SA).

As normas IEC 61215 (2005) e IEC 61646 (2008) especificam um teste de isolamento (*insulation test* – item 10.3 das normas) para os módulos fotovoltaicos, no qual o módulo é submetido, entre seus terminais (curtocircuitados) e sua moldura, a uma tensão de 1000Vcc mais duas vezes a tensão máxima no sistema especificada pelo fabricante. A norma IEC 61730-2 (2004) especifica outros testes adicionais de isolamento (*accessibility test* – MST11) e continuidade de terra (*ground continuity* – MST 13). Alguns fabricantes (Berger Lichttechnik, Spire Corp.) também já oferecem opcionalmente simuladores solares com capacidade de efetuar estes testes.

7. CONCLUSÃO

Com base nas considerações apresentadas no texto do artigo, entendemos que as características recomendadas para um equipamento simulador solar no estado-da-arte da tecnologia, destinado ao ensaio de módulos fotovoltaicos de acordo com as normas IEC 61215 (2005) e IEC 61646 (2008) são as seguintes:

- Lâmpada de Xe 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 1000W/m², 800W/m² e 200W/m², com distribuição espectral AM1,5
- Carga eletrônica com operação em 3 quadrantes, adequada às faixas de tensão, corrente e potência que se deseja medir

Entendemos que há disponibilidade de equipamentos comerciais que atendem a tais características no mercado atual.

Adicionalmente, consideramos ainda desejável que o equipamento também seja capaz de operar na técnica de eletroluminescência (EL), bem como de efetuar testes de isolamento de acordo com as normas IEC 61215 (2005)/ IEC 61646 (2008) e IEC 61730-2 (2004), proporcionando assim uma importante caracterização adicional dos módulos fotovoltaicos.

Caso se faça necessário um simulador do tipo contínuo, então deve-se observar que os melhores equipamentos disponíveis atualmente ainda são da classe AAA, e entendemos que, neste caso, a melhor opção é a de lâmpadas de vapores metálicos.

Quanto à evolução da tecnologia, acreditamos que os simuladores a LEDs apresentam grande potencial para desenvolvimento técnico e econômico e para aumentar sua participação no mercado a curto/médio prazo, muito embora, no momento exista apenas um fornecedor, cujo equipamento é certificado ainda na classe AAA pelo laboratório TÜV.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 10899; Energia solar fotovoltaica – Terminologia; 2006.
- All Real Technology; *Datasheet* do simulador solar apollo (*Large Area Steady State Solar Simulator – Apollo*); disponível em www.allreal.com.tw; nov/2013.
- Endeas Oy; *Datasheets* de simuladores solares da família *QuickSun®*; 2004.
- IEC 61730-2; Photovoltaic (PV) module safety qualification- Part 2: Requirements for testing, International Electrotechnical Commission; 2004.
- IEC 61215; Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval; Edition 2.0; International Electrotechnical Commission; 2005.
- IEC 60904-9; Photovoltaic devices – Part 9: Solar Simulator performance requirements; Edition 2.0; International Electrotechnical Commission; 2007.

IEC 60904-3; Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data; International Electrotechnical Commission; 2008.
IEC 61646; Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval; Edition 2.0; International Electrotechnical Commission; 2008.
Photon International; Nothing but the sun; pp 186-210; June, 2008.
Photon International; In a flash; pp 172-195; June, 2009.
Photon International; Competing with the sun; pp 210-241; June, 2010.
Photon International; Toward light-emitting diodes?; pp 200-234; June, 2011.
Photon International; Higher accuracy; pp 186-195; June, 2012.
Photon International; Closer to the sun; pp 116-124; June, 2013.

STATE OF THE ART OF THE TECHNOLOGY OF SOLAR SIMULATORS

Abstract. *The article presents an analysis of the technologies currently adopted in solar simulators for testing photovoltaic modules. The types of operation of solar simulators, as well as the characteristics of their light sources, including considerations on the spectral distribution of the lamps used, its lifespan and its energy consumption. Requirements and performance ratings of the simulators are also discussed, based on the specifications of the relevant IEC standards. The analysis of the characteristics of commercially available equipment is based on surveys published by Photon International Magazine. As conclusion, recommendations on the specifications considered best suited for solar simulators are presented.*

Key words: Solar Simulators; Lamps for solar simulators; testing of pv modules