

## Sistemas de Energia Solar

### *Advanced Topics - Células Solares Transparentes*

Bruno Mota – 46707

7 de Janeiro de 2019

### Índice

Resumo .....	1
Introdução .....	2
1-Evolução das células fotovoltaicas .....	3
2-Investigações e resultados experimentais .....	4
2.1- Células solares 100% transparentes ( <i>TPV</i> ).....	4
2.1.1- <i>TPV</i> vs <i>PV</i> opaco .....	4
2.1.2- Aplicações <i>TPV</i> .....	4
2.2- Outras tecnologias ( <i>STPV</i> vs <i>ECSWs</i> ).....	5
2.2.1- <i>STPV</i> vs <i>ECSWs</i> (nível ótico) .....	5
2.2.2- <i>STPV</i> vs <i>ECSWs</i> (nível térmico).....	7
2.3- Comparação geral.....	9
Conclusão.....	9
Bibliografia .....	10

### Resumo

Face à crescente procura por energia elétrica, a energia solar apresenta-se como sendo uma solução viável. Embora a introdução de módulos fotovoltaicos convencionais em telhados tenha crescido de forma rápida na última década, ainda existem alternativas de se acelerar a resposta às necessidades energéticas. O desenvolvimento, nos últimos 30 anos, de tecnologias fotovoltaicas transparentes com transmissão de luz parcial, deram início aos métodos de integração (por exemplo, em fachadas envidraçadas de edifícios), que antes não eram possíveis aos módulos *PV* convencionais. A implementação em grande escala, para colmatar a procura global de energia, pode ser ainda mais acelerada com o avanço de células solares totalmente transparentes que absorvem de forma seletiva a radiação ultravioleta e infravermelha próxima (*near-infrared light – NIR*), transformando superfícies de vidro em fontes de produção de energia elétrica, sem alterar a estética nem a funcionalidade do mesmo [1].

Neste relatório, serão analisados os recentes desenvolvimentos em tecnologias solares de diversos graus de transparência (*PV* opaco, *ECSWs*, *STPV* e *TPV*) e as características que devem ser tidas em consideração para a integração destes sistemas em aplicações como edifícios, janelas ou ecrãs de dispositivos eletrónicos.

## Introdução

Nos países desenvolvidos, o consumo energético associado a um edifício comercial ou residencial tem vindo a crescer de forma contínua. Isto tem acontecido, sobretudo, por gastos energéticos relacionados com o conforto dos ocupantes. Este conforto engloba, por exemplo, a necessidade de iluminação artificial e sistemas de climatização, de forma a garantir os níveis de iluminação e de temperatura interior adequados. As janelas dos edifícios são responsáveis pela garantia das condições de saúde biopsicológicas dos seus ocupantes, pelo facto de permitirem a entrada de luz solar, e levam à diminuição da necessidade de iluminação artificial. No entanto, também são as componentes mais vulneráveis em termos de trocas de calor com o exterior. Assim sendo, têm sido desenvolvidas tecnologias de envidraçamento (*glazing*) mais avançadas – janelas passivas e ativas (ativas implicam conversão da radiação incidente em energia elétrica, enquanto passivas implicam somente sombreamento) – com o intuito de reduzirem o consumo energético dos edifícios, melhorando as condições interiores [2].

Segundo diretivas europeias, a eficiência energética dos edifícios deve ser calculada através de metodologias que considerem a transmitância térmica, luz natural adequada, sistemas de climatização, utilização de fontes de energia renováveis, componentes passivas de aquecimento e arrefecimento, sombreamento, qualidade do ar interior e o *design* dos edifícios. Ainda dentro desta avaliação energética do edifício, pode ser incluída a implementação de novos elementos de construção, tais como sistemas fotovoltaicos (*building integrated photovoltaics modules – BIPV*) ou “janelas inteligentes” (*smart windows*) [2], que serão abordados a seguir.

As tentativas anteriores de criação de células solares transparentes, nos últimos 30 anos, apenas tiveram um sucesso parcial, pois embora tenham permitido certos métodos de integração que antes não eram possíveis com os módulos opacos convencionais (por exemplo, integração em janelas de edifícios) [1], estas ficavam sempre escurecidas/coloridas. Face a essas tentativas, uma equipa de investigadores da *Michigan State University* (EUA), orientada pelo professor de Engenharia Química e Ciência dos Materiais, Richard Lunt, revelou recentemente uma tecnologia única de célula fotovoltaica 100% transparente que permite gerar energia elétrica a partir da luz solar quando colocado sobre a superfície de uma janela ou de qualquer outro vidro. Prevê-se que esta tecnologia poderá estar na vanguarda de uma nova forma de aproveitamento da luz solar [3].

Assim, tecnologias de integração em edifícios, como módulos fotovoltaicos semi-transparentes (*semi-transparent PV modules – STPV*), transparentes (*transparent PV modules – TPV*), ou janelas eletrocromáticas “inteligentes” (*electrochromic smart windows – ECSWs*), têm surgido como alternativas com potencial para a redução do consumo energético de edifícios e até para a melhoria da sua autosuficiência. Pois, no caso dos *STPV* e *TPV*, permitem combinar a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis (radiação solar) com as melhorias a nível ótico e térmico do edifício (pela redução da radiação solar que atravessa a janela e pela diminuição das trocas de calor com o exterior). As *ECSWs* também permitem esse ajuste da luz natural e do calor que atravessa o vidro, pois esta tecnologia de janelas “inteligentes” é constituída por dois vidros transparentes e um dispositivo eletrocromático entre eles. Quando a radiação solar incide neste, cria-se um potencial elétrico que inicia reações redox, que conduzem à alteração da cor e transparência do mesmo [2], ou seja, levam à alteração da sua transmitância. Esta consiste na fração de luz incidente, com um comprimento de onda específico, que atravessa uma amostra de matéria [4].

Também, a utilização de células solares transparentes face às células opacas convencionais poderá ser uma enorme evolução. Essa evolução está relacionada com o facto da transparência destas novas células permitirem uma maior diversidade de aplicações sem alterarem as características dos objetos onde são colocados (por exemplo, em fachadas envidraçadas de edifícios, ecrãs de telemóveis, vidros de veículos elétricos, entre outros), permitindo-os tornar mais autosuficientes e até reduzir o consumo energético dos mesmos, como referido anteriormente. Isto verifica-se, pelo facto dos painéis solares opacos instalados em edifícios, estarem limitados às dimensões dos telhados e aos espaçamentos entre

eles (devido ao sombreamento entre painéis). Enquanto os módulos com células transparentes poderão ser colocados em fachadas envidraçadas já existentes não alterando as condições do edifício, nem a sua estética. Isto também permite que as janelas passem a ser de vidro-duplo, o que leva à redução de perdas térmicas do edifício e, conseqüentemente, gastos inferiores com sistemas de climatização [3].

Assim, neste trabalho, pretende-se analisar o potencial das células solares transparentes (*TPV*), o seu funcionamento, e os desafios à integração e impacto nos edifícios. Para a análise desses desafios, teve-se também em consideração projetos de investigação realizados por diversas entidades para outras tecnologias semelhantes (*STPV* e *ECSWs*), referidas anteriormente.

## 1- Evolução das células fotovoltaicas

Afastar os combustíveis fósseis do consumo global de energia elétrica requer inovação e tecnologias com base em energias renováveis com uma boa relação custo-benefício. As tecnologias fotovoltaicas (*PV*), se implementadas em área suficientemente alargadas, poderão satisfazer essas necessidades energéticas [1]. Para tal, têm sido desenvolvidos sistemas fotovoltaicos (Fig. 1) de aplicação em edifícios (*building-applied PV – BAPV*), por exemplo em telhados ou toldos e, mais recentemente, de integração em edifícios (*building-integrated PV – BIPV*), por exemplo em fachadas envidraçadas já existentes, como referido na introdução. A evolução dos *BIPVs*, baseia-se na alteração da transparência das células fotovoltaicas, permitindo alterar a fração de radiação visível que as atravessa (*average visible transmission – AVT*), e numa otimização da eficiência de conversão de energia (*power conversion efficiency – PCE*) para integração em edifícios.

O módulo solar opaco (Fig. 1a), apenas converte a radiação solar incidente em energia elétrica, não permitindo que a luz solar atravesse o módulo. Dentro das tecnologias *TPV* (Fig. 1b-f), estas agrupam-se em: seletivas em termos de comprimentos de onda (*wavelength-selective*) e não-seletivas (*non-wavelength-selective*) na sua absorção da luz visível. As não-seletivas produzem energia elétrica a partir de uma ampla gama do espectro solar (incluindo radiação visível) e conseguem obter algum *AVT* através da segmentação de células fotovoltaicas opacas (Fig. 1b) ou utilizando um material fotoativo suficientemente fino ou de baixa concentração (Fig. 1c, d). Normalmente atingem valores de *AVT* entre 0 a 50% e são importantes para aplicações como janelas coloridas ou construções decorativas exteriores. No que diz respeito às *TPV* seletivas, são constituídas por materiais fotoativos que captam radiação ultravioleta (*UV*) e infravermelho próximo (*near-infrared light – NIR*), enquanto transmitem de forma seletiva o espectro visível (Fig. 1e, f). Geralmente apresentam valores de *AVT* entre 50 a 90% [1].

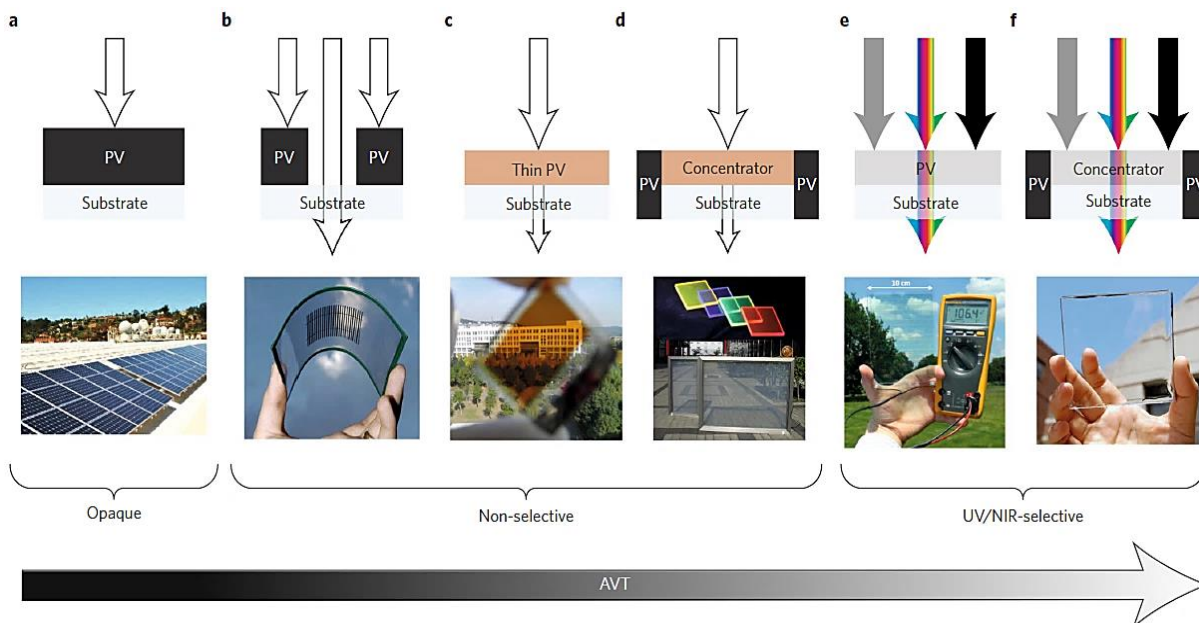


Fig. 1 – Tipos de sistemas fotovoltaicos: opaco (a), de comprimento de onda não-seletivo (b-d) e seletivo (e, f), por ordem crescente de grau de transmissão do espectro visível (*average visible transmission – AVT*). **a**, Diagrama de um *PV* convencional opaco, onde todo o espectro solar (representado pela seta branca) não é transmitido através do módulo e, em baixo, encontra-se um exemplo do mesmo. **b**, Diagrama de um segmento espacial *PV* e um exemplo de módulo. Neste, os módulos opacos num substrato transparente são espaçados para permitir a transmissão parcial de radiação solar. Quanto maiores os espaçamentos, maior será a transmissão de radiação, no entanto, leva a menor captação da mesma para conversão energética. **c**, Diagrama de uma camada fina *PV* não-seletiva e um exemplo de um módulo de *perovskite* (material “amarelo-torrado” constituído maioritariamente por Titanato de Cálcio). Nestas arquiteturas, a espessura da camada é controlada de forma a equilibrar a transmissão e o *PCE* (*power conversion efficiency*), onde o aumento da espessura melhora a conversão energética mas reduz a transmissão do espectro solar (estreitamento da seta branca) e a reprodução de cor. **d**, Diagrama de um concentrador solar não-seletivo e um exemplo de concentradores solares luminescentes (*LSCs*) coloridos e um concentrador de espelhamento (*scattering concentrator*). Estes captam luz através da absorção, reemissão e “guiando” os fótons incidentes consoante os comprimentos de onda por um corante (*LSCs*) ou por dispersão (*scattering concentrator*) para as extremidades do substrato, para serem captados por tiras *PV* montadas nas bordas. **e**, Diagrama de um *TPV* seletivo e um exemplo de módulo. **f**, Diagrama de um *LSC* seletivo, com tiras *PV* nas extremidades, e um exemplo de módulo. As tecnologias seletivas *TPV* captam preferencialmente a radiação UV (seta cinzenta) e o *NIR* (seta preta) e permitem a transmissão da radiação visível (seta colorida) [1].

## 2- Investigações e resultados experimentais

### 2.1- Células solares 100% transparentes (*TPV*)

A base das células fotovoltaicas 100% transparentes é a utilização de um concentrador solar luminescente transparente (*TLSC*) constituído por pequenas moléculas orgânicas, desenvolvidas pelo professor Richard Lunt, que permitem absorver o espectro da luz solar excluindo a gama do visível. A luz infravermelha é “guiada” para as extremidades do material onde é convertida em energia elétrica através de células fotovoltaicas, como referido anteriormente. Lunt explica que “é possível sintonizar esses materiais para captarem apenas os raios ultravioletas e os comprimentos de onda infravermelhos próximos (*near-infrared light*) que, em seguida, “brilham” noutra comprimento de onda no infravermelho. E como os materiais não absorvem nem emitem luz no espectro visível, eles parecem transparentes ao olho humano” [3]. Isto permite que este tipo de células possam ser inseridas em fachadas envidraçadas já existentes, sem alterarem a estética nem a funcionalidade dos edifícios, como exposto na introdução.

A eficiência associada às células solares transparentes ainda é reduzida (cerca de 5%), comparada com a de uma célula fotovoltaica de silício (entre 15 a 18%) [5]. No entanto, essa eficiência será sempre reduzida devido a permitir a passagem da radiação visível. O verdadeiro desafio ao desenvolvimento e generalização desta nova tecnologia, prende-se com a durabilidade, a longo prazo, da condutividade do eletrodo. Estima-se que esta ainda seja de poucos anos, sendo que o objetivo é que durem mais de 20 anos, tal como os módulos convencionais [6].

#### 2.1.1- *TPV* vs *PV* opaco

Em relação ao potencial desta nova tecnologia, esta permitirá reduzir a procura de energia anual dos países onde for implementada. No caso dos EUA, onde foi realizada a investigação de Richard Lunt, a sua equipa estimou que existem cerca de 5 a 7 mil milhões de metros quadrados de superfícies envidraçadas só nos EUA. E que a instalação desta nova tecnologia nessas superfícies, permitiria fornecer cerca de 40% da procura energética do país, sensivelmente 1400 TWh/ano (o equivalente ao que é obtido pelos painéis fotovoltaicos opacos). Esta equivalência verifica-se pois, mesmo com eficiência inferior por parte das células transparentes (5%) face às opacas (15 a 18%), Lunt concluiu que nos edifícios existe aproximadamente o dobro de área superficial envidraçada (*vertical footprint*) do que de telhado (*rooftop footprint*), daí a semelhança em termos de produção. E a sua implementação poderá tornar os edifícios em edifícios *NZEBs* (*nearly zero energy buildings*), isto é, de consumo energético praticamente nulo [1].

#### 2.1.2- Aplicações *TPV*

Para além disso, também existem muitas outras aplicações possíveis para os *TPV*, desde equipamentos relacionados com a Internet das Coisas (*internet of things - IoT*) até aos vidros de veículos elétricos (Fig. 2). Integrar os *TPV* no visor de dispositivos eletrónicos, por exemplo, permitirá o uso mais prolongado dos mesmos, dado que o módulo fotovoltaico transparente irá recarregar a bateria do dispositivo mantendo a qualidade de visão do ecrã. Em dispositivos de baixa potência, como *wearables* (dispositivos eletrónicos inteligentes, com controladores de atividade por exemplo, que podem ser incorporados na roupa ou utilizados no corpo – ex. *smartwatches* [7]), ou *e-readers* (dispositivos portáteis para leitura de versões eletrónicas de livros ou jornais [8]) o *TPV* pode eliminar a necessidade de se ligar o dispositivo a um carregador. O impacto do *TPV* na vida útil da bateria é avaliado comparando-se a média de consumo de energia do dispositivo eletrónico com a potência média produzida pelo módulo transparente nas condições de uso (Fig. 2) [1].

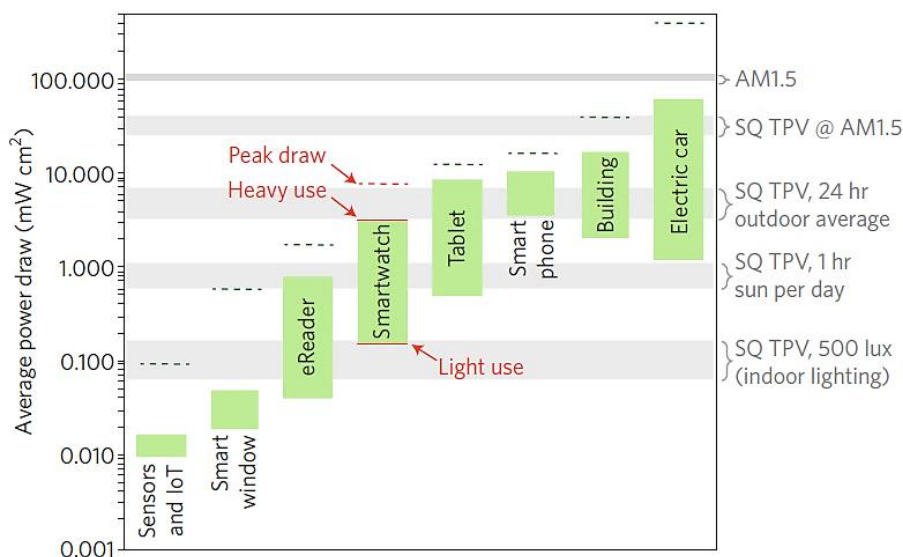


Fig. 2 – Média do consumo de energia por área de superfície do dispositivo onde se encontra aplicado o *TPV*, para diversas aplicações. As barras a verde correspondem à média de consumo de energia por parte dos dispositivos (isto é, a média de consumo de energia total em relação ao perfil de uso completo, incluindo períodos representativos de uso e de não-uso), consoante as marcas e tipo de utilização por parte do usuário (*Light* ou *Heavy use* – reduzida ou elevada utilização, respetivamente). As barras a cinzento representam a potência de saída de um *TPV* (*SQ TPV*) sob várias condições de iluminação. Para uma potência média de saída de *TPV* maior que a média de consumo energético de um dispositivo, resulta num dispositivo completamente autónomo (duração “infinita” da bateria), enquanto uma saída de energia mais reduzida conduz apenas a uma extensão da duração da bateria. As linhas a tracejado representam o pico de energia consumida (*Peak draw*) para cada tipo de dispositivo durante o seu uso completo (por exemplo, quando o ecrã é ligado) [1].

## 2.2- Outras tecnologias (*STPV* vs *ECSWs*)

A evolução no que toca aos materiais de construção, tal como as janelas electrocromáticas inteligentes (*electrochromic smart windows – ECSWs*) e os módulos fotovoltaicos integrados em edifícios (*building integrated photovoltaics modules – BIPV*) referidos na Introdução, permitem melhorar a eficiência energética dos edifícios [2]. Sendo que o *STPV* pode chegar a produzir 65 kWh/m<sup>2</sup>/ano [9].

### 2.2.1- *STPV* vs *ECSWs* (nível ótico)

Para se compararem estas duas tecnologias é necessário avaliarem-se as características óticas e térmicas das mesmas. A nível ótico, os procedimentos de teste existentes para o vidro em edifícios, são aplicados a ambas e permitem uma comparação adequada entre tecnologias. A sua caracterização baseia-se na norma *EN 410*, equivalente à norma internacional *ISO 9050*, que definem metodologias para a determinação das características solares e luminosas. Sendo que uma dessas características é a transmitância,  $T(\lambda)$ , já descrita na Introdução, e que foi medida com recurso a um espectrofotómetro,

modelo *Perkin Elmer® Lambda 900 UV/vis/NIR* [2]. Os valores de transmitância obtidos para cada um dos sistemas em função do comprimento de onda, encontram-se expostos na Fig. 3.

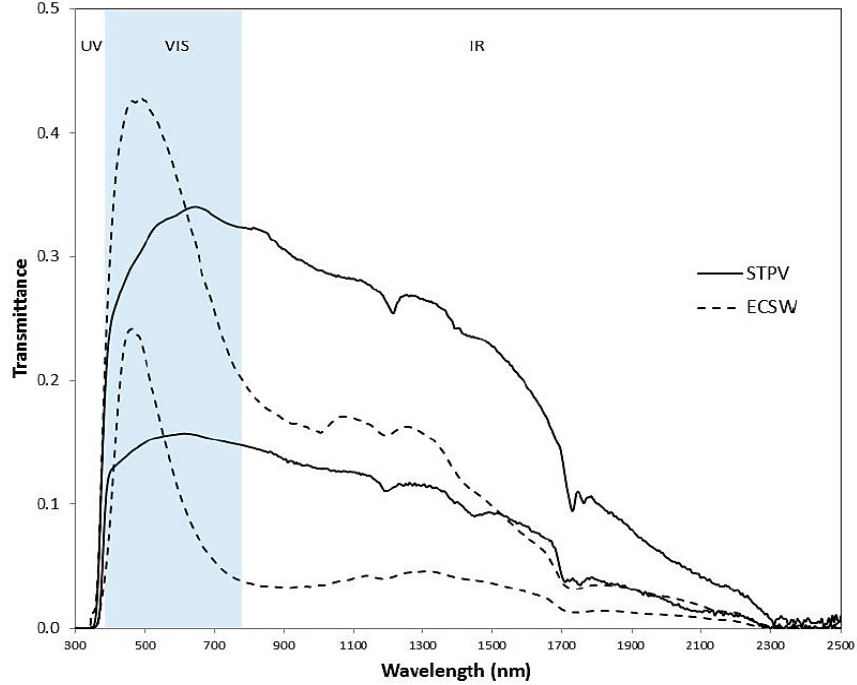


Fig. 3 – Curvas de transmitância espectral de duas amostras de módulos fotovoltaicos semi-transparentes (*STPV*) e de janelas eletrocromáticas inteligentes (*ECSWs*) para diferentes níveis de carga. É de salientar a diferença de peso, em termos de alcance visível e infravermelho, para cada tecnologia [2].

Uma outra característica medida foi a refletância,  $R(\lambda)$ . Sendo que, com este valor e o de  $T(\lambda)$ , foi possível determinar-se a transmitância e a refletância associadas à luz visível ( $\tau_v, \rho_v$ ), que representam a fração de luz incidente a partir de um sistema de iluminação padrão de luz solar (*D65 daylight standard illuminant*) que é transmitida ou refletida pelo envidraçamento, respectivamente, e que é medido por um observador fotópico padrão  $V(\lambda)$  (*standard photopic observer*), assumido como referência [2].

$$\tau_v(\alpha) = \frac{\sum_{\lambda} T(\lambda, \alpha) \cdot D65(\lambda) \cdot V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda} D65(\lambda) \cdot V(\lambda) \Delta\lambda}, \quad \rho_v(\alpha) = \frac{\sum_{\lambda} R(\lambda, \alpha) \cdot D65(\lambda) \cdot V(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda} D65(\lambda) \cdot V(\lambda) \Delta\lambda} \quad (1)$$

Também, permite determinar a transmitância e refletância solar direta ( $\tau_e, \rho_e$ ), que representa a fração de radiação solar incidente (de  $\lambda$  entre 300 a 2500 nm) que é transmitida ou refletida pelo envidraçamento, ponderado pela irradiância espectral solar padrão  $S(\lambda)$  (*standard solar spectral irradiance*) [2].

$$\tau_e(\alpha) = \frac{\sum_{\lambda} T(\lambda, \alpha) \cdot S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \Delta\lambda}, \quad \rho_e(\alpha) = \frac{\sum_{\lambda} R(\lambda, \alpha) \cdot S(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \Delta\lambda} \quad (2)$$

Outras características a nível óptico são: o fator solar ( $g$ ), o coeficiente de sombreamento ( $SC$ ) e os índices de seletividade ( $S$ ) e de reprodução de cores ( $CRI$  – *color rendering index*). O fator solar  $g$  (ou  $g$ -value), representa a energia solar total transmitida para o interior através do envidraçamento, tanto por transmissão direta como por emissão interna de parte da energia que foi absorvida pelo vidro:

$$g = \tau_e + \alpha_e h_i / (h_i + h_e) \quad (3)$$

onde  $\alpha_e$  é a absorvância solar direta (calculada a partir de  $\alpha_e = 1 - \tau_e - \rho_e$ ) e  $h_i$  e  $h_e$  são os coeficientes de calor interno e externo, respectivamente. Sendo  $h_i = 7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  e  $h_e = 25,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  os



valores padrão segundo a norma *EN 673* [2]. O coeficiente de sombreamento (*SC*), compara o *g-value* da amostra testada com o de uma amostra padrão de vidro com espessura de 3-4 mm (*thick float glass*), e determina-se pela expressão  $SC = g/0,87$ . O índice de seletividade (*S*), compara a transmitância da luz visível com o fator solar ( $S = \tau_v/g$ ). Níveis elevados de *S* indicam que o equipamento permite um bom controlo da luz solar e elevada transmissividade da mesma. O *CRI* representa a eficácia na reprodução de cores através do envidraçamento. Considera-se um bom nível de *CRI* entre 0,60-0,79, e um nível excelente para valores de superiores a 0,80 [2]. Os resultados obtidos para as medições das características óticas em função da transmitância visível, para *STPV* e *ECSWs*, encontram-se na Fig.4 [2].

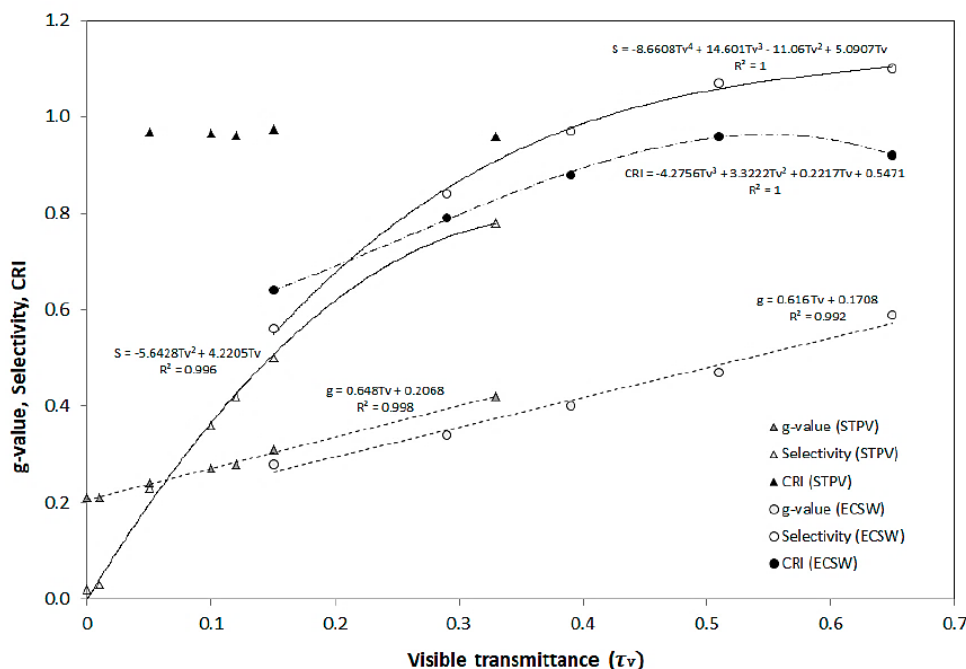


Fig. 4 – Valores de fator solar (*g-value*), índice de seletividade (*Selectivity*) e de índice de reprodução de cor (*CRI*) para as amostras em análise, bem como a reta de regressão linear para cada uma das características, exceto para o *CRI* do *STPV*, em que os valores são praticamente constantes independentemente da transmitância visível.

Pela figura acima, é possível constatar-se que a transmitância máxima visível ( $\tau_v = 0,65$ ) é obtida pela tecnologia *ESCW*, que também apresenta o valor mais elevado de fator solar ( $g = 0,60$ ). Estes valores são adequados para janelas em climas frios e temperados. Também é possível observar-se que, para todas as amostras, o fator solar diminui linearmente com a transparência (transmitância visível), aproximando-se de valores mais adequados para janelas implementadas em climas quentes ( $g < 0,40$ ). Para valores fixos de transparência, por exemplo para 0,30, as *ECSWs* têm valores de fator solar cerca de 15% inferiores aos de *STPV*, e de 10% para uma transmitância visível de 0,15. Isto significa que, o coeficiente de sobreamento é proporcionalmente mais elevado para as *ECSWs* que para o *STPV* na gama em estudo. Este varia de 0,32-0,68 para *ECSWs* e de 0,24-0,48 para *STPV*. Pelo mesmo motivo, o índice de seletividade é maior para as *ECSWs* que para *STPV* (para igual valor de transmitância visível tem-se um aumento de 10% para  $\tau_v = 0,30$  e de 12% para  $\tau_v = 0,15$ ) [2].

### 2.2.2- *STPV* vs *ECSWs* (nível térmico)

Pelo contrário, os procedimentos de teste térmico interno não são adequados a nenhuma das tecnologias, visto que a capacidade de absorção de radiação por parte destes elementos depende da temperatura (e esta depende fortemente da irradiância), algo que não é considerado nos padrões atuais [2]. Assim, para se caracterizar esta dependência, foram monitorizados diferentes *STPVs* e *ECSWs* sob condições de irradiância exteriores (Fig. 5). Através da relação entre a irradiância e as temperaturas

superficial e ambiente obtidas para cada uma das tecnologias (Fig. 6), foi possível determinar-se a sua temperatura nominal ( $T_N$ ), substituindo na Equação (4) os valores obtidos, permitindo a comparação entre elas [2].

$$T_s = T_a + G \cdot (T_N - 20)/800 \quad (4)$$

Onde as temperaturas são em °C,  $T_s$  é a temperatura da superfície,  $T_a$  é a temperatura ambiente,  $G$  a irradiância solar e  $T_N$  é a temperatura nominal. Sendo que esta última é um valor constante para cada um dos sistemas à temperatura ambiente de 20°C e  $G = 800\text{W/m}^2$ . Os valores de  $T_N$  obtidos encontram-se expostos na Tabela 1.



Fig. 5 – Montagem experimental ao ar livre de diversas amostras de STPV e ECSW. A temperatura superficial foi medida com recurso a termopares colocados na parte traseira do vidro das amostras, exceto nas amostras de vidros duplos [2].

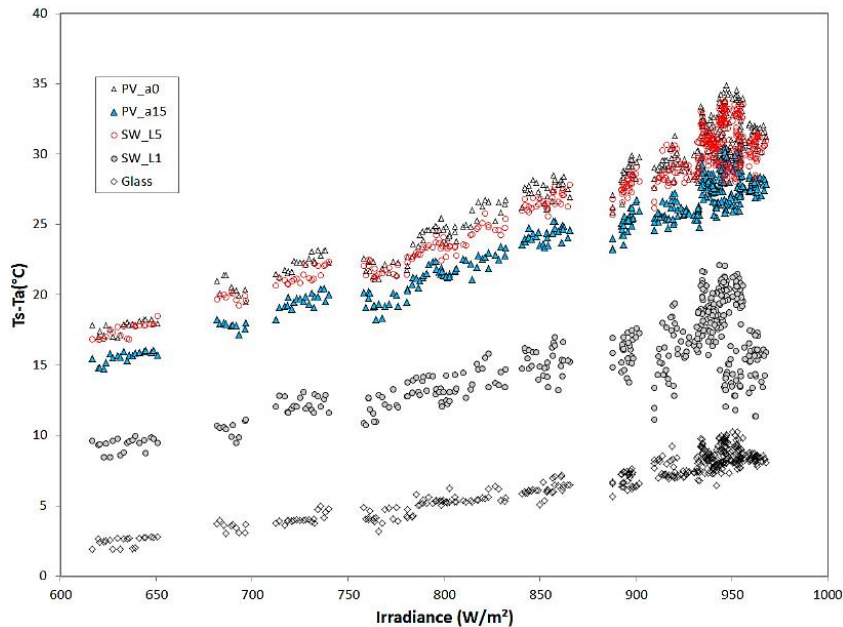


Fig. 6 – Diferenças de temperatura entre a superfície da amostra e a temperatura ambiente em função da irradiância. Estes valores foram substituídos na Equação (4), para se obterem as temperaturas nominais de cada tecnologia (Tabela 1) [2].

Tabela 1 – Temperaturas nominais ( $T_N$ ) de operação para diferentes amostras analisadas, bem como a razão de equivalência associada às retas de regressão linear ( $R^2$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) [2].



	PV_a0	PV_a15	SW_L5	SW_L1
$T_N$ (°C)	45.8	42.8	45.2	34.4
$R^2$	0.85	0.85	0.84	0.54
$\sigma$ (°C)	1.6	1.4	1.6	2.0

Com estes testes exteriores, foi possível comprovar-se que a temperatura de operação do *STPV* e do *ECSW* é afetada de forma diferente pela radiação solar incidente. Tendo-se obtido valores de temperatura nominal mais elevados (45,8 e 45,2 °C) para os sistemas mais escurecidos (PV\_a0 e SW\_L5, respetivamente), como se verifica na Tabela 1. Em termos de ajuste ao modelo ( $R^2$  próximo de 1), os melhores resultados também foram para as amostras de *STPV* e *ECSW* mais escurecidas.

### 2.3- Comparação geral

Face às diferentes tecnologias de integração referidas, é possível fazer-se uma comparação em termos de aplicações entre elas (Fig. 7). Estas aplicações dependem do grau de transparência (*average visible transmission – AVT*) e da eficiência de conversão de energia (*power conversion efficiency – PCE*)[1].

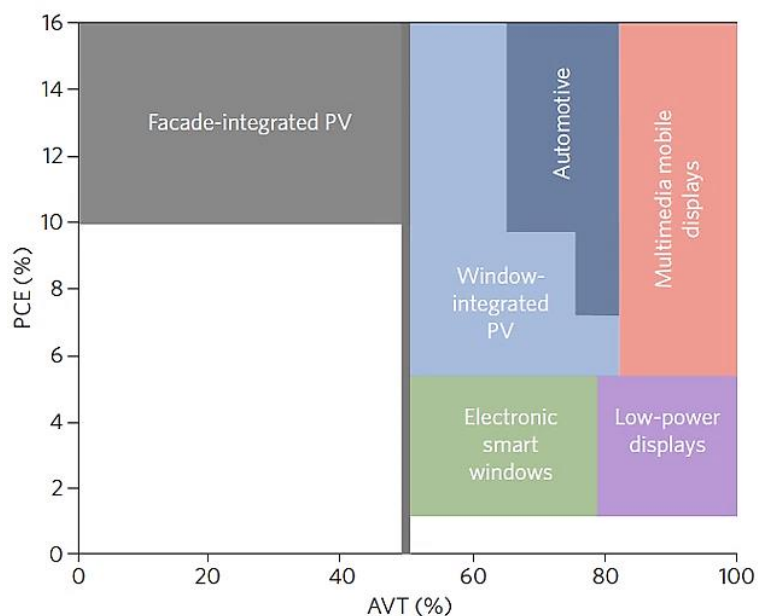


Fig. 7 – Requisitos para aplicações de sistemas de integração em edifícios, em termos de fração de radiação visível que os atravessa (*AVT*) e de eficiência de conversão energética (*PCE*). Tipicamente, um envidraçamento colorido para edifícios possui entre 0 a 50% de transparência, enquanto os ecrãs eletrónicos exigem pelo menos 80%. Valores de *PCE* entre 2-5% permitem alimentar de forma autónoma janelas inteligentes e ecrãs de baixa potência. Para o *TPV* fornecer energia a ecrãs de telemóveis ou obter um custo de energia competitivo (*LCOE – lowest levelized cost of electricity*) face à utilização de *STPV* em aplicações em edifícios ou na indústria automóvel, necessita de valores de *PCE* entre 5 a 10%.

## Conclusão

Neste trabalho, avaliou-se o funcionamento e potencial associado a diversas tecnologias (*PV* opaco, *TPV*, *STPV* e *ECSWs*), com especial ênfase nas células solares transparentes (*TPV*). Para tal, fez-se a análise de certas características a ter-se em consideração na integração em edifícios (transmitância, fator solar, temperatura de operação, índices de seletividade e de reprodução de cores, entre outras), para se perceber o impacto destas no consumo energético dos mesmos. Pela Fig. 4, constatou-se que as *ECSWs* apresentam os valores mais elevados de transmitância e de fator solar ( $\tau_v=0,65$  e  $g=0,60$ , respetivamente) face ao *STPV*, sendo as mais adequadas para janelas em climas frios e temperados. Também, a diminuição da transparência implica valores inferiores de fator solar ( $g$ ), aproximando-se de valores mais adequados para janelas em climas quentes ( $g < 0,40$ ). Para valores fixos

de transparência, as *ECSWs* apresentam valores de fator solar inferiores aos de *STPV*. Sendo que, quanto menor o valor de transparência, menor a diferença entre o fator solar de ambos. Desta forma, o coeficiente de sombreamento é mais elevado nas *ECSWs* (0,32-0,68) que no *STPV* (0,24-0,48), bem como o índice de seletividade,  $S$  (para igual valor de transmitância visível, tem-se um aumento de  $S$  de 10% para  $\tau_v=0,30$  e de 12% para  $\tau_v=0,15$ ) [2]. Em relação à temperatura nominal de operação, os valores mais elevados registaram-se para os módulos mais escurecidos de ambas as tecnologias (45,8 e 45,2 °C para *STPV* e *ECSW*, respetivamente). Em termos de *TPV*, os estudos indicam que esta tecnologia permitirá fornecer cerca de 40% da procura energética dos EUA (1400 TWh/ano). Este valor é idêntico ao da produção a partir de módulos *PV* opacos convencionais, mesmo com eficiência inferior a estes (5% nos *TPV* face aos 15-18% de eficiência nos *PV* opacos), dado que se estima que existam, nesse país, cerca de 5 a 7 mil milhões de metros quadrados de superfícies envidraçadas (sensivelmente o dobro de superfície de telhados). Face à análise realizada, foi possível verificar-se que as tecnologias estudadas se complementam e que as suas aplicações finais dependem das características de cada uma (Fig. 7).

A implementação em larga escala de células solares transparentes, de forma a compensar as necessidades globais, exige melhorias no que diz respeito à durabilidade a longo prazo da condutividade do elétrodo (que ainda é apenas de alguns anos [6]). Contudo, o *TPV* já se apresenta como uma alternativa promissora para o aproveitamento da luz solar e que pode ser implementado em diversas superfícies que antes eram inacessíveis aos módulos solares opacos convencionais (por exemplo, vidros de edifícios e de veículos elétricos ou ecrãs eletrónicos) [1].

## Bibliografia

- [1] C. J. Traverse, R. Pandey, M. C. Barr, and R. R. Lunt, “Emergence of highly transparent photovoltaics for distributed applications,” *Nat. Energy*, vol. 2, no. 11, pp. 849–860, 2017.
- [2] N. Martín-Chivelet, C. Guillén, J. F. Trigo, J. Herrero, J. J. Pérez, and F. Chenlo, “Comparative performance of semi-transparent PV modules and electrochromic windows for improving energy efficiency in buildings,” *Energies*, vol. 11, no. 6, 2018.
- [3] “CÉLULA SOLAR TRANSPARENTE É INVENTADA NOS ESTADOS UNIDOS,” *Portal Solar*. [Online]. Available: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/curiosidades-sobre-energia-solar/celula-solar-transparente-e-inventada-nos-estados-unidos.html>. [Accessed: 22-Dec-2018].
- [4] “Transmitância,” *Wikipédia*. [Online]. Available: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Transmitância>. [Accessed: 28-Dec-2018].
- [5] “Células solares transparentes prontas para envelopar o mundo,” *Inovação Tecnológica*, 26-Oct-2017. [Online]. Available: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=celulas-solares-transparentes-envelopar-mundo&id=010115171026#.XC0rL1X7T3h>. [Accessed: 27-Dec-2018].
- [6] E. Gent, “The Huge Promise of Transparent Solar Cells—Turning the World’s Glass Surfaces Into Solar Panels,” *SingularityHub*, 2017. [Online]. Available: <https://singularityhub.com/2017/10/31/the-promise-of-transparent-solar-cells-turning-the-worlds-glass-surfaces-into-solar-panels/#sm.00002x072418hjdggqzmtmftlru661v>. [Accessed: 29-Dec-2018].
- [7] “Wearable technology,” *Wikipedia*, 2018. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wearable\\_technology](https://en.wikipedia.org/wiki/Wearable_technology). [Accessed: 23-Dec-2018].
- [8] “E-reader,” *Wikipedia*, 2018. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/E-reader>. [Accessed: 23-Dec-2018].
- [9] J. Peng, D. C. Curcija, L. Lu, S. E. Selkowitz, H. Yang, and W. Zhang, “Numerical investigation of the energy saving potential of a semi-transparent photovoltaic double-skin facade in a cool-summer Mediterranean climate,” *Appl. Energy*, vol. 165, pp. 345–356, 2016.