

## Artigo

## Janelas Eletrocrômicas: Uma Nova Era em Eficiência Energética de Oliveira, R. S.; Semaan, F. S.; Ponzio, E. A.\*

Rev. Virtual Quim., 2015, 7 (1), 336-356. Data de publicação na Web: 14 de novembro de 2014

<http://www.uff.br/rvq>

### Electrochromic Windows: A New Age in Energy Efficiency

**Abstract:** In this work an overview regarding smart electrochromic windows as a promising technology capable of providing significant energy savings in buildings is presented. Electrochromic windows are devices able to control of light and acclimatization of indoor spaces. Therefore, these technologies allow energy savings with lighting and HVAC systems of these spaces. These devices are already commercially available and research and development in such field is increasing, due to its technological and financial importance.

**Keywords:** Electrochromism; electrochromic; smart window; energy saving; sunshine; buildings.

### Resumo

Neste trabalho é apresentada uma visão sobre as janelas eletrocrômicas inteligentes como uma tecnologia promissora, capaz de propiciar grande economia de energia em edificações. As janelas eletrocrômicas são dispositivos capazes de controlar a luminosidade e o climatização em ambientes fechados, desta maneira, estas estruturas permitem uma economia energética com sistemas de iluminação e climatização destes espaços. Estes dispositivos já se encontram disponíveis comercialmente e a pesquisa e desenvolvimento nesta área é crescente, devido à sua importância tecnológica e financeira.

**Palavras-chave:** Eletrocromismo; eletrocrômico; janela inteligente; economia de energia; luz do sol; edificações.

\* Universidade Federal Fluminense, Grupo de Eletroquímica e Eletroanalítica, Instituto de Química, Departamento de Físico-Química, Outeiro de São João Batista s/nº, CEP 24020-141, Centro, Niterói-RJ, Brasil.

✉ [eaonzio@vm.uff.br](mailto:eaonzio@vm.uff.br)

DOI: [10.5935/1984-6835.20150017](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150017)

## Janelas Eletrocrômicas: Uma Nova Era em Eficiência Energética

Renato S. de Oliveira,<sup>a</sup> Felipe S. Semaan,<sup>b</sup> Eduardo Ariel Ponzio<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal Fluminense, Grupo de Eletroquímica e Eletroanalítica, Instituto de Química, Departamento de Físico-Química, Outeiro de São João Batista s/nº, CEP 24020-141, Centro, Niterói-RJ, Brasil.

<sup>b</sup> Universidade Federal Fluminense, Instituto de Química, Departamento de Química Analítica, Outeiro de São João Batista s/nº, CEP 24020-141, Centro, Niterói-RJ, Brasil.

\* [eaponzio@vm.uff.br](mailto:eaponzio@vm.uff.br)

*Recebido em 14 de novembro de 2014. Aceito para publicação em 14 de novembro de 2014*

1. Introdução
2. Janelas Eletrocrômicas Inteligentes
3. Mercado das Janelas Eletrocrômicas
4. Considerações Finais

### 1. Introdução

A pesquisa com relação ao aquecimento global se iniciou no final do século XXI com o primeiro artigo científico publicado em 1896 por Arrhenius,<sup>1</sup> que abordou pela primeira vez o termo “aquecimento global”. A partir disto, o interesse por este tema cresceu bastante, o que pode ser evidenciado pelo grande aumento do número de publicações ao longo dos anos. Dentre as consequências deste efeito, destacam-se o aumento da temperatura global, a elevação do nível dos mares e consequentes implicações em outros mecanismos globais, com sérios problemas para fauna, flora e vida humana.

Os efeitos do aquecimento global são maximizados com a emissão de gases de efeito estufa, como o CO<sub>2</sub>, são agravados pelo fato que cerca de metade da população do mundo vive em cidades, e a expansão das

megacidades é rápida e acaba criando as “Ilhas urbanas de calor” com temperaturas bem mais elevadas que a região periférica.

Um recente relatório divulgado pelo *International Panel on Climate Change* (IPCC)<sup>2</sup> mostra como esses fenômenos podem afetar a vida humana, elaborando cenários para diversos níveis de gravidade para o aquecimento, suas consequências, causas relacionadas (aumento da população mundial, elevação de liberação de gases causadores do efeito estufa e aumento do uso de combustíveis fósseis, etc.) e medidas que podem ser adotadas para frear os efeitos causados. A utilização de fontes alternativas de energia, como biodiesel, e medidas de economia de energia são algumas das ações que podem ajudar a minimizar os efeitos do aquecimento global.

Buscando a economia de energia elétrica em ambientes fechados, muitos estudos vêm sendo realizados, já que o homem passa

grande parte de seu tempo dentro de edificações e, portanto, cada vez mais energia é usada para a climatização desses ambientes. Diversos estudos revelam que são gastos entre 20 e 40% da energia total para a manutenção dos edifícios nos países desenvolvidos.<sup>3</sup> Por exemplo, na Europa, cerca de 40% do fornecimento de energia é atualmente utilizado para aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação de edifícios, bem como para os aparelhos elétricos. Em termos financeiros, o que corresponde a aproximadamente 4% do Produto Interno Bruto.

No ano de 2010, os sistemas de arrefecimento, aquecimento, iluminação e ventilação foram responsáveis por 60% de toda energia gasta no setor de construção civil. Todos estes indicativos mostram que um sistema que permita a economia de energia nestes ambientes é de muita valia.

No Brasil, a situação apresentada é bastante semelhante a média mundial, com o setor residencial responsável por grande parte de consumo de energia elétrica. Dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2013<sup>4</sup> realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) apontam que o setor é responsável por 26% do total de energia elétrica consumida no país, sendo responsável por uma grande parcela do consumo total. Por esse motivo, esforços têm sido feitos na busca de novas tecnologias que possam ser utilizadas na redução de energia elétrica.

Nesse sentido podemos ressaltar que o uso de janelas eletrocromáticas inteligentes podem ser atualmente consideradas umas das mais promissoras formas de economia de energia. Esses dispositivos possuem um material que tem a capacidade de alterar a sua coloração (espectro UV-Vis-NIR) através de um estímulo elétrico externo. Com isso a intensidade de luz do sol que é transmitida através dessas janelas pode ser controlada, possibilitando, dessa forma, que os ambientes tenham sua luminosidade e o calor controlados. Com isso, há muito a se ganhar com o desenvolvimento de tecnologias para regular os fluxos de energia

solar e luminosidade com gastos energéticos mínimos, com o uso das janelas eletrocromáticas inteligentes.

Um exemplo de eficiência energética é um edifício que utiliza janelas inteligentes<sup>5</sup> que foi estudado em algumas simulações recentes.<sup>6</sup> A utilização de janelas inteligentes em um escritório padrão com algumas variáveis fixas tais como tamanho, área da janela, demanda de iluminação, ocupação, equipamentos, etc., mostraram que a energia poupada foi muito considerável para o sistema de climatização. O bloco de escritórios estudados foi posicionado com uma fachada voltada para Sul e uma frente para o Norte e as simulações foram realizadas com dados climáticos aplicáveis às cidades de Roma (Itália), Bruxelas (Bélgica) e Estocolmo (Suécia). Ao usar as janelas inteligentes ao em vez da convencional, a energia para a refrigeração do espaço, numa base anual, foi reduzida em até 40-50%. Um resultado interessante das simulações<sup>6</sup> foi quando as janelas inteligentes foram usadas, pois a potência de refrigeração poderia ser reduzida para que o ar condicionado fosse evitado nas regiões norte e média da Europa, assim o custo marginal destas janelas pode ser compensado pela eliminação de um sistema de ar condicionado.

Um relatório produzido pelo departamento de energia dos Estados Unidos da América (EUA) estima que 41% da energia consumida nos EUA em 2009 foi direcionada ao setor dos edifícios (comerciais e residenciais), e isto representou um aumento de 48% em relação ao ano de 1980. Desse total, 19% pode ser atribuído ao arrefecimento e a iluminação dos espaços.<sup>7</sup> Os estudos realizados nos EUA mostraram que as janelas inteligentes são até 75% mais eficientes no verão e 45% no inverno, em relação as janelas comuns, obtendo-se uma economia de energia de até 25% no total,<sup>8</sup> sendo então, grandes responsáveis pela economia de energia.

A luz do sol carrega grande quantidade de energia para as edificações. O uso indiscriminado de grandes áreas transparentes em fachadas, sem elementos

de proteção solar, tem sido questionado, principalmente devido aos problemas gerados pelo excessivo ganho de calor que ocorre através dessas superfícies. Algumas variáveis de projeto tais como, a orientação geográfica e as características óticas dos materiais especificados (vidros e policarbonatos), podem implicar significativo acúmulo de densidade de energia no interior das edificações, traduzindo-se em desconforto térmico e mesmo visual para os usuários.

O envelope de uma edificação pode ser interpretado como uma barreira entre as condições externas e as internas, sobre as quais não se tem controle imediato. Uma das funções do bom projeto arquitetônico é promover o controle das condições dos ambientes internos, funcionando o envoltório da edificação como filtro que exclua as ocorrências indesejáveis do ambiente externo e aproveite as benéficas. A

radiação solar é uma delas: pode vir a ser muito benéfica, quando bem aproveitada, como também pode ser especialmente indesejável em determinadas condições. Atento a essa questão, o mercado tem proposto soluções técnicas alternativas, tais como os vidros coloridos, os termorrefletores, os filmes de controle solar, as micropersianas, as janelas de caixilhos duplos e triplos, vidros dicróicos e, mais recentemente, os vidros ou janelas eletrocrômicas.

As janelas eletrocrômicas têm como função principal modular ou diminuir a intensidade de transmissão luminosa visível ou infravermelha em ambientes fechados, diminuindo desta forma o consumo de energia elétrica gasta com lâmpadas e ar condicionado. A Figura 1 mostra alguns exemplos de edificações nas quais são utilizadas janelas eletrocrômicas.



**Figura 1.** Janelas inteligentes utilizadas em edifícios<sup>9</sup>

As janelas inteligentes estão sendo utilizadas em um número crescente de edifícios,<sup>10</sup> a Figura 2 mostra dois exemplos de ambientes que possuem janelas eletrocrômicas na forma de multipainéis, de forma que alguns estão em seu estado

totalmente colorido e outros estão descoloridos. É importante destacar que esta tecnologia se enquadra às nanotecnologias verdes, que estão muito em foco na atualidade.



**Figura 2.** Instalações testes de dois exemplos de janelas inteligentes electrocrômicas. Reprodução da ref. 10 com autorização. Copyright© 2014 Elsevier, U.K.

O painel superior na Figura 2 ilustra uma aplicação de janelas electrocrômicas inteligentes produzidas pela *Sage Electrochromics* nos EUA em um escritório no *Lawrence Berkeley National Laboratory*, EUA. O painel inferior mostra uma aplicação de janelas inteligentes produzidas por *ChromoGenics AB* na instalações da empresa em *Uppsala*, na Suécia.

A pesquisa sobre a tecnologia do electrocromismo recebeu um impulso poderoso na primeira metade da década de 1980, quando esta nova tecnologia se tornou amplamente aceita principalmente por ter boa eficiência energética.<sup>11,12</sup> O termo "janela inteligente" foi criado em 1984-1985<sup>13-15</sup> e chamou a atenção imediata não só dos cientistas, mas também da mídia e do público em geral.

Para realizar um estudo utilizando janelas inteligentes (electrocrômicas) com intuito de verificar o desempenho das janelas inteligentes a respeito da diminuição do consumo de energia foi construído, em 2006, um prédio pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* na Universidade de Berkeley.<sup>6</sup>

Este trabalho teve como objetivos sensibilizar os consumidores a respeito desta tecnologia emergente e construir as ferramentas necessárias e os recursos de informação necessários para permitir o uso destas janelas inteligentes em edifícios residenciais e comerciais, de modo a promover eficiência energética além de outros benefícios. As janelas electrocrômicas possibilitaram uma redução de consumo de energia para o sistema de iluminação entre 6 a 25%, além de diminuir o consumo de energia com o sistema de refrigeração de 19 a 26%. Dentre os diversos estudos realizados, o trabalho sugere que a economia de energia dos edifícios pode atingir entre 15 a 25% anuais. Outro ponto abordado neste estudo é com relação às barreiras típicas de mercado enfrentadas por esta tecnologia: a falta de informação, a falta de sensibilização dos consumidores e a falta de ferramentas e recursos de informação necessária para projetar e especificar sistemas de janelas electrocrômicas em edifícios. Para a eficaz implementação destes dispositivos é necessário que ocorra um conjunto de estudos que ajudem os arquitetos e

engenheiros a entender melhor o princípio de funcionamento de tal tecnologia em edifícios e avaliar os impactos de desempenho para justificar os custos.

Em 2013, o mesmo grupo de pesquisa da Universidade de Berkeley realizou um estudo piloto para avaliação do desempenho de janelas eletrocromicas e termocromicas em Denver, Colorado. Este estudo foi desenvolvido para explorar e avaliar vários aspectos práticos do desempenho das duas tecnologias. O objetivo foi focado na tentativa de uma compreensão detalhada da tecnologia, a sua maturidade, e seus potenciais impactos e, especificamente, verificar a redução de uso de energia para o aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), compreensão de como as janelas inteligentes afetam o conforto dos ocupantes, aceitação da tecnologia, e viabilidade econômica desta tecnologia. Os resultados obtidos mostram que quando utilizadas as janelas eletrocromicas tem-se uma redução de 22% na utilização anual de AVAC, comparado às janelas convencionais. Especificamente, a carga de refrigeração diminuiu 45% e o consumo de gás diminuiu 19%. Porém, a principal barreira para a adoção destas janelas é o custo, pois o estudo mostra que o retorno financeiro seria em torno de 21,5 anos com base na poupança energética.

Outra área de aplicação dos vidros inteligentes é a indústria automobilística, por exemplo, a Ferrari Superamérica com teto solar eletrocromico. A tecnologia do teto

eletrocromico foi desenvolvida pelos pesquisadores da Saint-Gobain Sekurit, uma das mais importantes produtoras mundiais de vidros automotivos, em conjunto com a Ferrari. Mediante o acionamento de um botão, no console central do automóvel, o sistema elétrico do vidro permite ou não a passagem de luz para o seu interior. Com esse recurso, escurece ou clareia o ambiente em cinco variações do nível de transmissão luminosa, de acordo com o desejo do motorista.<sup>16</sup> Outra aplicação é em espelhos retrovisores eletrocromicos que funcionam de modo a atenuar a intensidade luminosa por eles refletida, e que no caso da aplicação automotiva oferece mais segurança ao motorista para dirigir, evitando ofuscamento de sua visão. Vale destacar que no Brasil existem em circulação no mercado automotivo alguns veículos que utilizam materiais eletrocromicos em espelhos retrovisores, dentre eles o Hyundai i30, Fiat Palio Adventure Locker, Chevrolet Omega, dentre outros.

Os materiais eletrocromicos também podem ser usados em telas (displays) cujo princípio de funcionamento é semelhante ao espelho, sendo que neste caso a radiação que nele incide se reflete de modo difuso e o material eletrocromico tem como função variar a cor nele observada. Dentre as vantagens deles, destacam-se o alto contraste óptico, alta velocidade de mudança de cor e menor custo. A Figura 3 mostra um exemplo de tela eletrocromica flexível da Siemens.



Figura 3. Tela eletrocromica flexível da Siemens<sup>17</sup>

Todas as aplicações dos materiais eletrocromicos só são possíveis devido à utilização destes em um conjunto denominado dispositivo eletrocromico. A seção seguinte descreve as janelas eletrocromicas, os materiais eletrocromicos e suas diferentes classificações.

## 2. Janelas Eletrocromicas Inteligentes

A radiação solar é a fonte de energia renovável mais abundante existente, e com o avanço na tecnologia de sistemas fotovoltaicos a pesquisa e o desenvolvimento na produção de energia elétrica a partir da energia solar está em crescente desenvolvimento. Em contra partida, a energia solar também é a causadora de grande consumo de energia pelas edificações, pois acarreta em um enorme gasto energético com os sistemas de refrigeração de ambientes fechados.

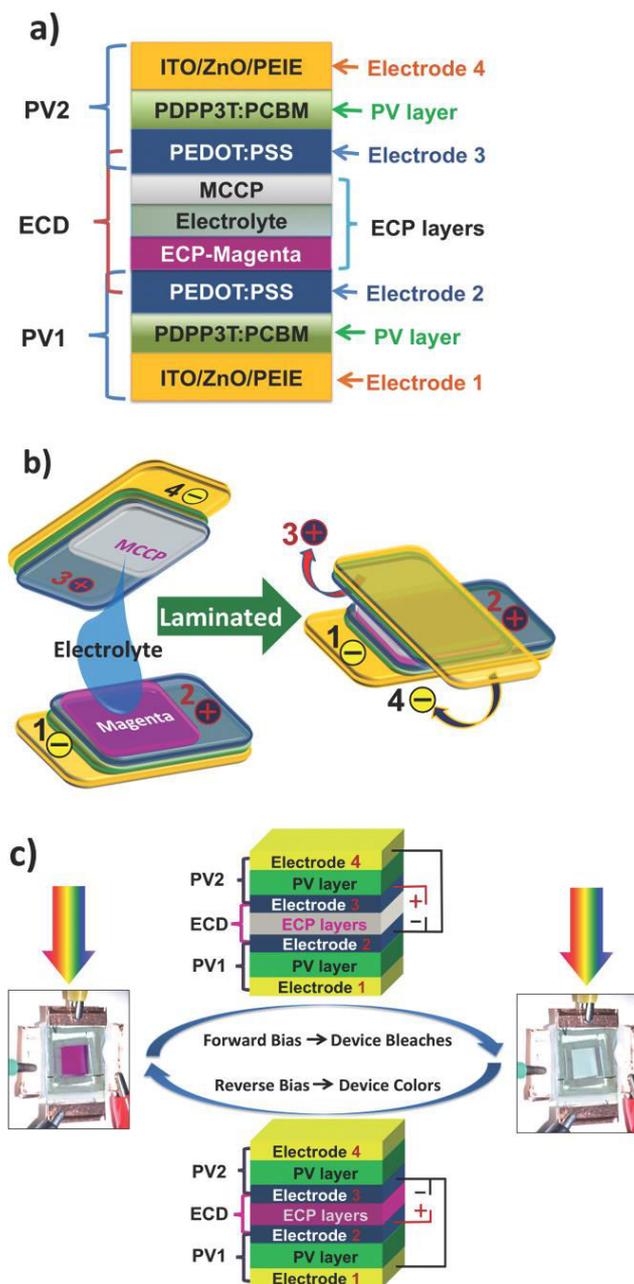
Uma tecnologia muito eficaz na diminuição do consumo de energia elétrica com iluminação e sistema de climatização de ambientes é a das janelas eletrocromicas inteligentes, como foi mencionado anteriormente. Estas janelas também são chamadas de janelas inteligentes ou janelas de transmitância controlável, pois permitem o controle efetivo do calor e da luminosidade de ambientes através de suas mudanças no espectro UV-Vis-NIR. Estas mudanças de coloração são controláveis e reguláveis, pois são causadas por um estímulo elétrico

externo, conseqüentemente, estas janelas necessitam de uma fonte de energia para funcionar. Entretanto, o gasto energético desta fonte de energia é extremamente pequeno ao se comparar com a economia de energia propiciada por este dispositivo.

Neste sentido, com intuito de solucionar esta questão de alimentação externa da janela eletrocromica, muitos esforços no sentido de integrar a janela eletrocromica com um dispositivo fotovoltaico vêm sendo realizados, resultando na auto-alimentação ou em um dispositivo fotoeletrocromico.<sup>18-24</sup>

Em um recente trabalho, Dyer e colaboradores<sup>24</sup> desenvolveram um sistema no qual foi incorporado um sistema fotovoltaico (PV) na estrutura da janela eletrocromica (CE), o qual foi chamado de janela fotoeletrocromica verticalmente integrada. A Figura 4 mostra todas as camadas deste dispositivo, a montagem dos eletrodos e suas diferentes colorações.

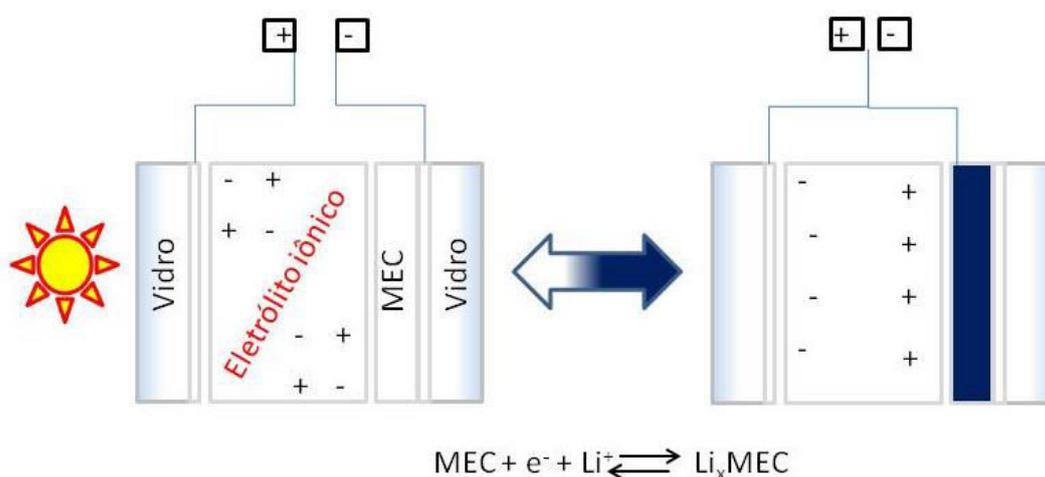
Uma janela eletrocromica é composta por dois eletrodos opticamente transparentes e o material eletrocromico pode estar diluído junto com o eletrólito que separa estes eletrodos ou na forma de filme fino sobre um dos eletrodos. Os eletrodos opticamente transparentes mais utilizados são o óxido de estanho dopado com índio (ITO) e o óxido de estanho dopado com flúor (FTO).<sup>11,12</sup> Estes semicondutores são depositados na forma de um filme fino sobre vidro ou no caso do ITO, também sobre poli(tereftalato de etileno), conhecido como PET, para aplicação em sistemas flexíveis.



**Figure 4.** Conceito e estrutura do dispositivo eletrocromico suportado com energia solar. a) estrutura de seção transversal esquemática do dispositivo CE/PV vertical. O dispositivo consiste de duas células invertidas PV (PV1 e PV2) e uma célula eletrocromica CE. Os eletrodos que constituem o dispositivo são (eletrodo 1) o eletrodo que coleta os elétrons da célula PV inferior, (eletrodo 2) o eletrodo de coleta de "buracos" da mesma célula PV/eletrodo de trabalho do ECD, (eletrodo 3) eletrodo de coleta de buracos do eletrodo de célula superior PV/ contra eletrodo do ECD e (eletrodo 4) o eletrodo de coleta de elétrons da célula PV superior; b) esquema dos componentes do dispositivo em camadas (a numeração corresponde aos eletrodos em (a)); c) fotografia e esquema d o dispositivo CE/PV mostrando as conexões necessárias para provocar a descoloração (figura superior) ou coloração (figura inferior) de ECD sob iluminação Reprodução da ref. 24 com autorização. Copyright© 2014 Wiley, D.E.

Outro fato interessante é a possibilidade de se depositar o material somente em um dos eletrodos ou pode-se, também usar dois materiais diferentes, um em cada eletrodo, de modo que o contra-eletrodo pode ser opticamente passivo ou electrocromicamente complementar, ou seja, quando um dos eletrodos se oxida o outro é reduzido e seus estados coloridos e descoloridos coincidem. De acordo com a terminologia usada para a construção de um dispositivo electrocromico, nestes sistemas o eletrodo de trabalho é chamado de eletrodo primário e o contra eletrodo de eletrodo secundário. Um esquema de funcionamento básico de uma janela electrocromica é apresentado na Figura

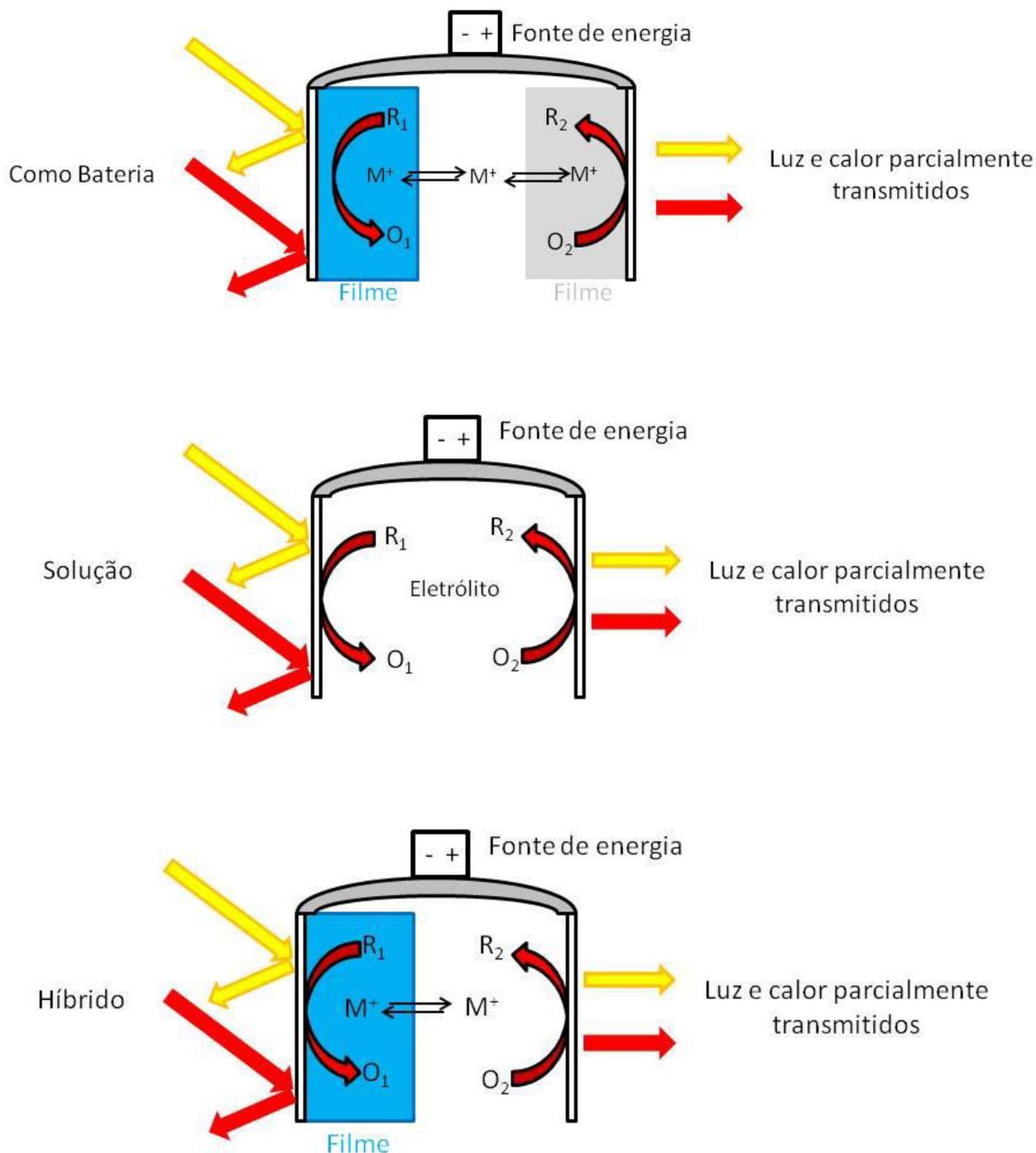
5 a seguir. Neste exemplo, nota-se que o material electrocromico (MEC) encontra-se inicialmente transparente, porém, ao ser ligado o circuito, o material sofre uma reação de redução que é a responsável pela sua simultânea mudança de coloração e consequentemente íons lítio do eletrólito são inseridos na estrutura do MEC de modo a manter o princípio da eletroneutralidade. Vale a pena ressaltar que esta mudança de coloração (transparente/azul) no exemplo em questão é reversível e seus possíveis estágios intermediários de colorações podem ser controlados com a carga elétrica inserida no sistema.



**Figura 5.** Esquema de um dispositivo electrocromico contendo os eletrodos opticamente transparentes (vidros com camadas condutoras transparentes), o eletrólito (líquido ou polimérico) e o material electroativo

Uma janela electrocromica é também conhecida e chamada por dispositivo electrocromico, e pode existir em três configurações (apresentadas sob forma esquemática na Figura 6), tal como apontado por Torresi e colaboradores:<sup>25</sup> como baterias, em solução e como estruturas híbridas. Na configuração como bateria um filme fino do material electrocromico é depositado tanto no eletrodo de trabalho quanto no contra-eletrodo, há um condutor iônico (eletrólito) entre estes eletrodos que pode ser na forma

de gel polimérico ou filme fino sólido e ambos são isolados eletricamente. Já nas configurações em solução e estruturas híbridas são sistemas em que uma ou ambas substâncias são dissolvidas em um líquido ou um gel eletrolítico onde ocorre o processo de difusão. Um dispositivo electrocromico requer equilíbrio de carga entre os eletrodos na face oposta tal forma que a carga inserida durante a meia reação catódica deve ser exatamente equilibrada pela carga extraída do lado anódico do dispositivo.<sup>25</sup>



**Figura 6.** Configuração de um dispositivo eletrocromico em três diferentes configurações: como bateria, em solução e híbrido

Os materiais eletrocromicos que se tornam coloridos quando oxidados são chamados de materiais eletrocromicos anódicos e aqueles que se tornam coloridos quando são reduzidos são chamados de

materiais eletrocromicos catódicos, sendo que existem alguns materiais que podem apresentar coloração catódica e anódica. Estas e outras classificações dos materiais eletrocromicos podem ser encontradas em

diversos artigos e capítulos de livros.<sup>10,26-28</sup> Dentre os materiais eletrocromicos, podemos citar alguns deles, como:  $\text{WO}_3$ ,<sup>29,30</sup>  $\text{MoO}_3$ ,<sup>31,32</sup>  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,<sup>33,34</sup>  $\text{TiO}_2$ ,<sup>20,21</sup>  $\text{NiO}$ ,<sup>35,36</sup>  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,<sup>37,38</sup> viológenos e seus derivados,<sup>27,28</sup> ftalocianinas,<sup>39,40</sup> materiais híbridos,<sup>27,37,41</sup> compostos de coordenação,<sup>42-44</sup> polímeros condutores,<sup>45-47</sup> dentre outros.<sup>48-50</sup> É interessante ressaltar que muitos trabalhos são encontrados na literatura a respeito das janelas inteligentes que utilizam diversos materiais na sua confecção, pois cada material possui características peculiares que produzem diferentes propriedades que afetam nas janelas eletrocromicas inteligentes.<sup>10,21,29,35,51</sup>

Existem alguns parâmetros utilizados para caracterizar os dispositivos eletrocromicos, porém é difícil obter valores satisfatórios para todos os parâmetros de operação ao mesmo tempo. Para a operação eficiente de um dispositivo eletrocromico é necessário que quatro parâmetros sejam considerados:<sup>52</sup>

i) alta eficiência eletrocromica ( $\eta$ ), a qual relaciona a quantidade de carga injetada com a variação de coloração produzida, sendo que, quanto maior a relação entre variação óptica e variação de carga melhor a eficiência eletrocromica do sistema ( $\eta = \Delta\text{Abs}/Q$ , dada em  $\text{cm}^2 \cdot \text{C}^{-1}$ );

ii) memória óptica, que diz respeito à persistência da coloração do material após a interrupção do estímulo elétrico;

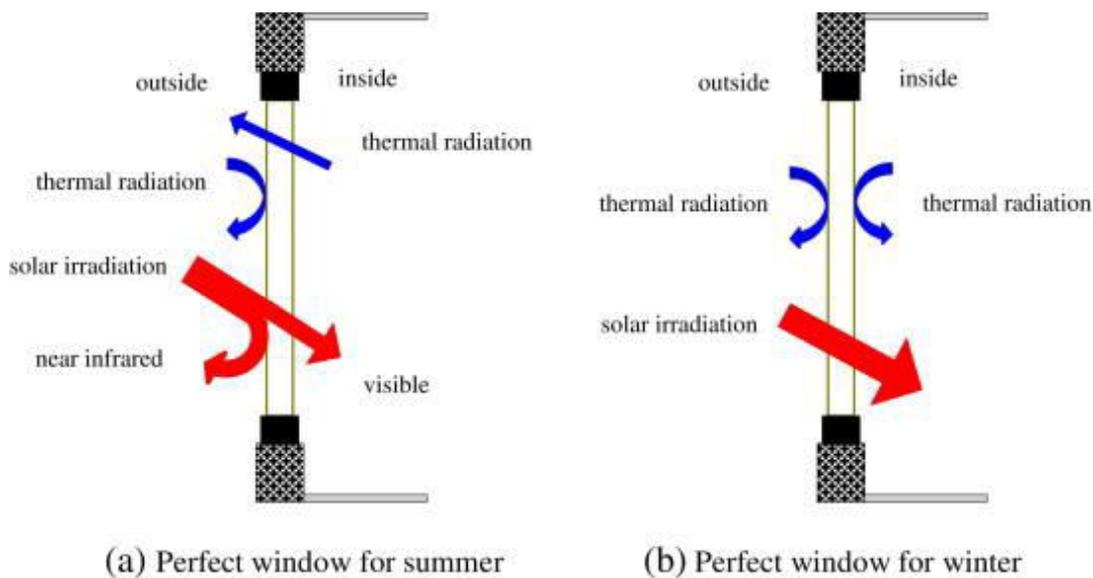
iii) tempo de resposta curto, definido como o tempo que o material leva para alterar sua coloração em resposta ao estímulo elétrico;

iv) boa estabilidade e durabilidade.

Uma janela eletrocromica inteligente deve possuir um conjunto destes parâmetros que a torne um bom dispositivo para a aplicação em particular.

O número de patentes relacionadas às janelas inteligentes apresentou um crescimento nos últimos 10 anos, mostrando então, a sua grande importância tanto tecnológica quanto científica. Além das diversas patentes em relação às janelas eletrocromicas muitas revisões vem sendo realizadas sobre as mesmas.<sup>10,53</sup>

Uma janela inteligente perfeita é aquela que se adequa às diferentes estações do ano, principalmente ao verão e ao inverno de uma dada região. Os conceitos de janelas perfeitas para o verão e para o inverno e o índice de consumo de energia foram discutidos por Ye e colaboradores.<sup>54</sup> A Figura 7 mostra o diagrama esquemático de uma janela perfeita para o verão e para o inverno. A janela perfeita para o verão não possui capacidade de absorção do espectro solar. Ela é transparente à luz visível, e totalmente reflexiva à radiação solar acima de 700 nm e abaixo 400 nm. Ela é unidirecional e transparente às radiações térmicas de grandes comprimentos e onda, ou seja, a radiação térmica emitida a partir dos ambientes internos pode transmitir para o exterior, mas aquela proveniente do exterior é totalmente refletida. A janela perfeita para o inverno é totalmente transparente para todo o espectro solar, e totalmente refletora para a radiação térmica a partir de ambientes interiores e exteriores. Neste contexto, as janelas eletrocromicas inteligentes podem ser inseridas.



**Figura 7.** Diagrama esquemático de uma janela perfeita para o verão em (a) e para o inverno em (b). Reprodução da ref. 55 com autorização. Copyright© 2013 Elsevier, U.K.

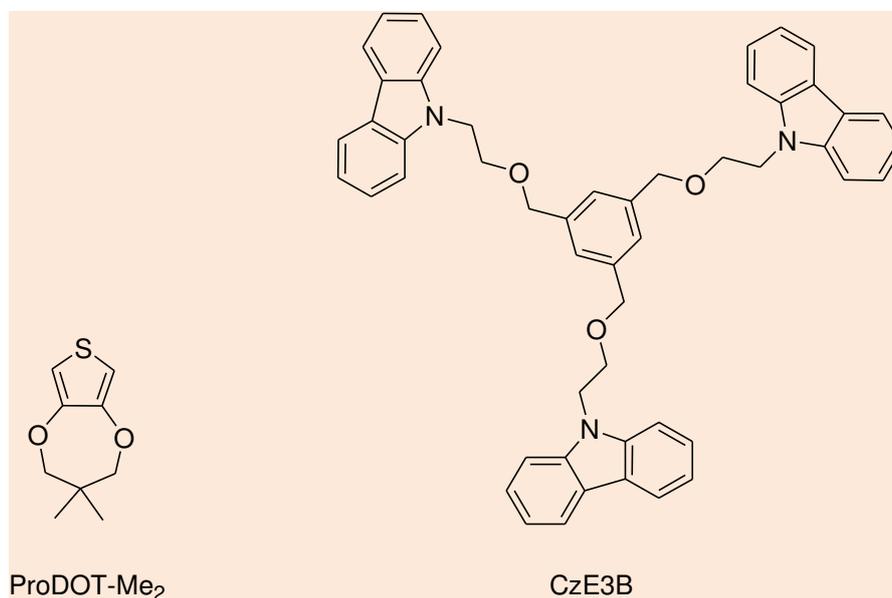
Em um recente trabalho, Tavares e colaboradores<sup>56</sup> mostraram que reabilitações de edifícios antigos são essenciais para uma melhoria do consumo de energia destas construções. Dentro deste contexto, este trabalho enfocou a economia de energia que pode ocorrer usando as janelas eletrocromáticas, mostrando ser uma interessante alternativa tecnológica emergente de dispositivos para controlar o ganho de energia solar nos edifícios localizados em climas mediterrânicos. Neste trabalho, ajustes das propriedades ópticas das janelas foram discutidas de acordo com a faixa de funcionamento. O comportamento dinâmico da janela e as diferentes estratégias de controle foram modeladas e implementadas no programa de simulação de construção ESP-r. Também foi estudado o impacto da janela eletrocromática na economia na energia para aquecimento e arrefecimento, considerando diferentes parâmetros ambientais (temperatura interior e exterior e radiação incidente) e pontos de ajuste para o controle da janela. Uma comparação entre 3 janelas (simples, dupla, e janela eletrocromática), o tipo de construção, os ganhos internos de ocupação, iluminação e equipamentos e a orientação das janelas foram considerados para discussão através

da análise das necessidades energéticas para aquecimento e refrigeração. Concluiu-se que, para este clima os resultados mais positivos foram obtidos quando a janela eletrocromática era voltada para a fachada oeste. Para a fachada sul os resultados não mostram vantagens significativas no uso de janelas eletrocromáticas. Outro ponto importante deste trabalho é que os autores mostram que considerando as economias de energia obtidas de 20,28 e 36,94 kWh m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup> para janelas nas fachadas leste/oeste, e um simples retorno de 10 anos (os habituais períodos de garantia dos fabricantes), a atratividade econômica é alcançada se o custo extra é inferior a 28,39 / 51,72 € por m<sup>2</sup> de vidro.

Kim e colaboradores<sup>57</sup> montaram uma janela eletrocromática utilizando, como um dos eletrodos, um filme de poli-1,3,5-tris (2(9H-carbazol-9-il)metil) benzeno, chamado de poli-CzE3B que foi eletropolimerizado na superfície de um eletrodo de ITO. O filme de poli-CzE3B funcionou como um contra eletrodo colorido anódico, pois possui coloração por meio de um processo de oxidação, e intensificou a coloração da janela ao longo da região do visível. Esta janela eletrocromática teve como base um filme de poli-3,3-dimetil-3,4-di-hidro-2H-tieno [3,4-b]

[1,4] dioxepina (PProDOT-Me<sub>2</sub>) e outro de poly-CzE3B, formando um dispositivo que exibiu um elevado contraste eletrocromico. A Figura 8 mostra a estrutura dos dois

monômeros usados para a síntese do (PProDOT-Me<sub>2</sub>) e do poly-CzE3B aplicados na janela eletrocromica.



**Figura 8.** Estrutura dos monômeros utilizados na polimerização para a construção da janela eletrocromica<sup>57</sup>

A janela produzida Kim e colaboradores<sup>57</sup> foi de grande porte, como mostrado na Figura 9, e foi fabricada com sucesso, apresentando estabilidade cíclica, óptica e eletroquímica. A eficiência eletrocromica do filme de PProDOT-Me<sub>2</sub> foi de 268 e 234 cm<sup>2</sup>.C<sup>-1</sup> respectivamente para os comprimentos de onda de 580 e 628 nm. Já o filme de poly-CzE3B apresentou uma eficiência eletrocromica de 80.6 e 152 cm<sup>2</sup>.C<sup>-1</sup> para os mesmos comprimentos de onda anteriores. Já a janela eletrocromica baseada nos filmes de PProDOT-Me<sub>2</sub> (coloração catódica) e poli-CzE3B (coloração anódica) indicaram 315 e 247 cm<sup>2</sup>.C<sup>-1</sup> para os comprimentos de onda de 580 e 628 nm

respectivamente. Desta maneira foi demonstrado que o uso do filme de poli-CzE3B como contra eletrodo aumentou a eficiência da coloração da janela. A janela apresentou alto contraste eletrocromico (%ΔT) de 62% com tempo mínimo de 0,5% em 580 nm e 57% com tempo mínimo de 1,3% em 628 nm. Outro parâmetro interessante foi o tempo de coloração e descoloração da janela, que foram respectivamente 12 s e 5 s para o comprimento de onda de 580 nm. Este dispositivo eletrocromico orgânico foi mais rápido que alguns dispositivos eletrocromicos inorgânicos.<sup>53,58</sup>



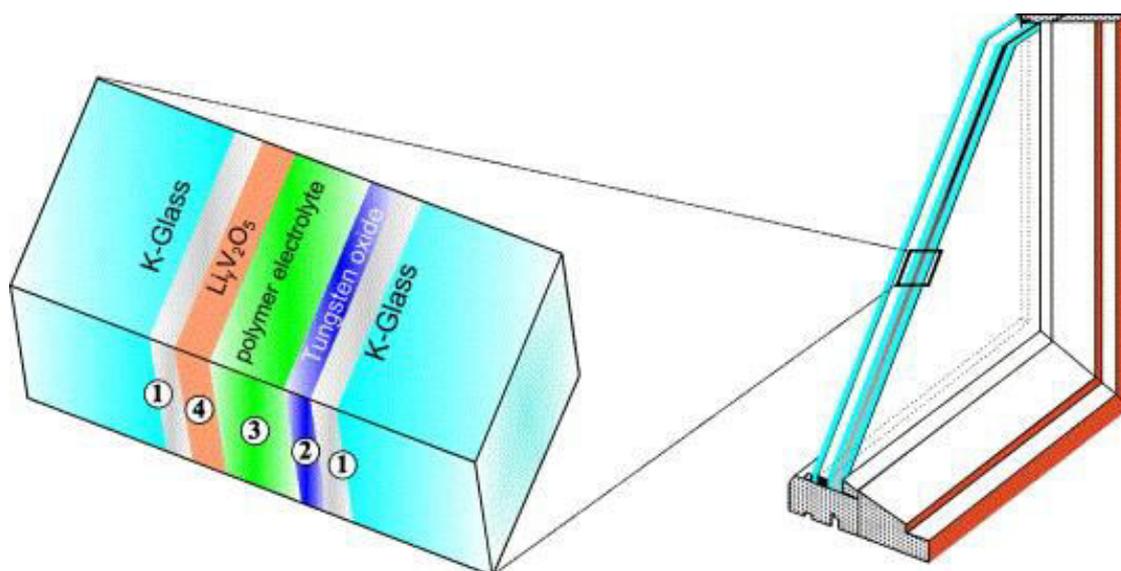
**Figura 9.** Fotos da janela eletrocromica com o estado descolorido (à esquerda) e colorido (à direita) baseada nos filmes de PProDOT-Me<sub>2</sub> e poli-CzE3B (305 x 305 mm<sup>2</sup>). Reprodução da ref. 57 com autorização. Copyright© 2013 Elsevier, U.K.

Syrakou e colaboradores<sup>59</sup> realizaram uma análise da eco-eficiência de uma janela eletrocromica utilizando indicadores adequadamente definidos para avaliar o seu desempenho atuando como um componente de economia de energia em edifícios. Neste trabalho os indicadores foram combinados para vários parâmetros (cenário de controle, vida útil esperada, tipo climático, o custo de aquisição) e algumas conclusões significativas foram formadas para o desenvolvimento e potenciais aplicações do dispositivo em comparação com outros produtos comerciais. O estudo demonstrou que a redução do custo de aquisição (200 € m<sup>2</sup>) e o aumento do tempo de vida (acima de 15 anos) são os dois principais alvos para atingir tanto o custo quanto a eficiência ambiental. Segundo Syrakou e colaboradores<sup>59</sup> um dispositivo eletrocromico implementado em áreas de refrigeração e operado com uma estratégia de ótimo controle para a vida útil esperada máxima (25 anos), pode reduzir o consumo de energia de um edifício em 52%. Além disso, de acordo com o estudo realizado, a economia total de energia foi 33 vezes maior do que a energia necessária para a sua produção e a emissão de 615 kg CO<sub>2</sub> equivalentes por unidade vidro eletrocromico

poderiam ser evitadas.

A Figura 10 mostra o protótipo de janela eletrocromica inteligente proposta por Syrakou e colaboradores<sup>59</sup> de modo que em (1) há uma fina película condutora transparente (FTO-óxido de estanho dopado com flúor) depositada sobre o vidro, em (2) um filme eletrocromico de WO<sub>3</sub> usado como material primário opticamente ativo, que possui algumas propriedades como modulação reversível da transmitância, estabilidade na presença de eletrólitos como íons lítio e próton, prolongada durabilidade, reversibilidade, ciclabilidade e sua produção é relativamente fácil, em (3) um eletrólito iônico condutor polimérico em gel produzido pela diluição de LiClO<sub>4</sub> em carbonato de propileno misturado com polimetilmetacrilato (PMMA) e em (4) uma camada de óxido de vanádio litiado (Li<sub>v</sub>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) depositada sobre o outro eletrodo de FTO que foi usado como material opticamente ativo secundário.

A transmitância deste protótipo de 40 cm x 40 cm variou de 63% a 2% para os estados descolorido e colorido respectivamente e a eficiência eletrocromica deste dispositivo em 550 nm foi de 50 cm<sup>2</sup>.C<sup>-1</sup>.



**Figura 10.** Layout da janela eletrocromática. Reprodução da ref. 59 com autorização. Copyright© 2006 Elsevier, U.K.

Em 1990, Lamper<sup>60</sup> realizou alguns testes de durabilidade de um dispositivo eletrocromático. Este trabalho se inicia com uma discussão dos critérios de desempenho para vidros com transmitância variável aplicados em edificações. O autor também abordou a concepção de vários tipos destes dispositivos, que são distinguidos pela estrutura e pelo tipo de eletrólito. De forma geral, Lampert<sup>60</sup> afirmou que o futuro destes dispositivos eletrocromáticos parecia muito promissor, entretanto, muitos outros estudos de designers precisavam ser levados em consideração para uma melhor eficiência destes dispositivos na economia energética de edificações.

Realmente é muito importante realizar alguns estudos de viabilidade da aplicação das janelas inteligentes em edificações, estudos com relação ao posicionamento das janelas em relação ao sol nas diferentes estações do ano, automação do sistema de controle do dispositivo, controle da refrigeração dos ambientes internos e da transmitância da janela a luz solar, dentre outros, para que a economia energética proposta por esse sistema seja capaz de amortizar os custos de sua implementação em um período de tempo inferior ao da durabilidade destas janelas, que dependendo da forma de utilização pode variar de 10 a 20

anos.

Um estudo realizado com os fabricantes de janelas dos Estados Unidos, no ano 2000, informou que 71,7% dos executivos e gerentes envolvidos no desenvolvimento de novos produtos ou de planejamento de produtos já tinham o conhecimento sobre as janelas de transmitância controlada, as janelas inteligentes. Entretanto, o conhecimento das características específicas destas janelas inteligentes ainda era limitado, pois somente uma parte de todos os entrevistados foi capaz de citar algumas das propriedades mais básicas deste produto.<sup>61,62</sup>

Outro ponto importante a ser abordado é que a venda da indústria deste tipo de dispositivos ainda é modesta em relação à sua previsão promissora. No ano de 2002 um estudo do *Freedonia Group* (Cleveland, OH) relatou que a demanda por vidros inteligentes nos Estados Unidos era projetada para crescer a uma taxa anual composta de aproximadamente 20% até 2006 o que correspondia a 445 milhões dólares.<sup>61</sup>

De acordo com Sottile<sup>61</sup>, a medida que as taxas de crescimento da indústria das janelas inteligentes forem aumentadas em outras regiões do mundo, existe uma alta probabilidade de que os vidros de transmitância controlada estejam entre as

principais novas classes de produtos de tecnologia.

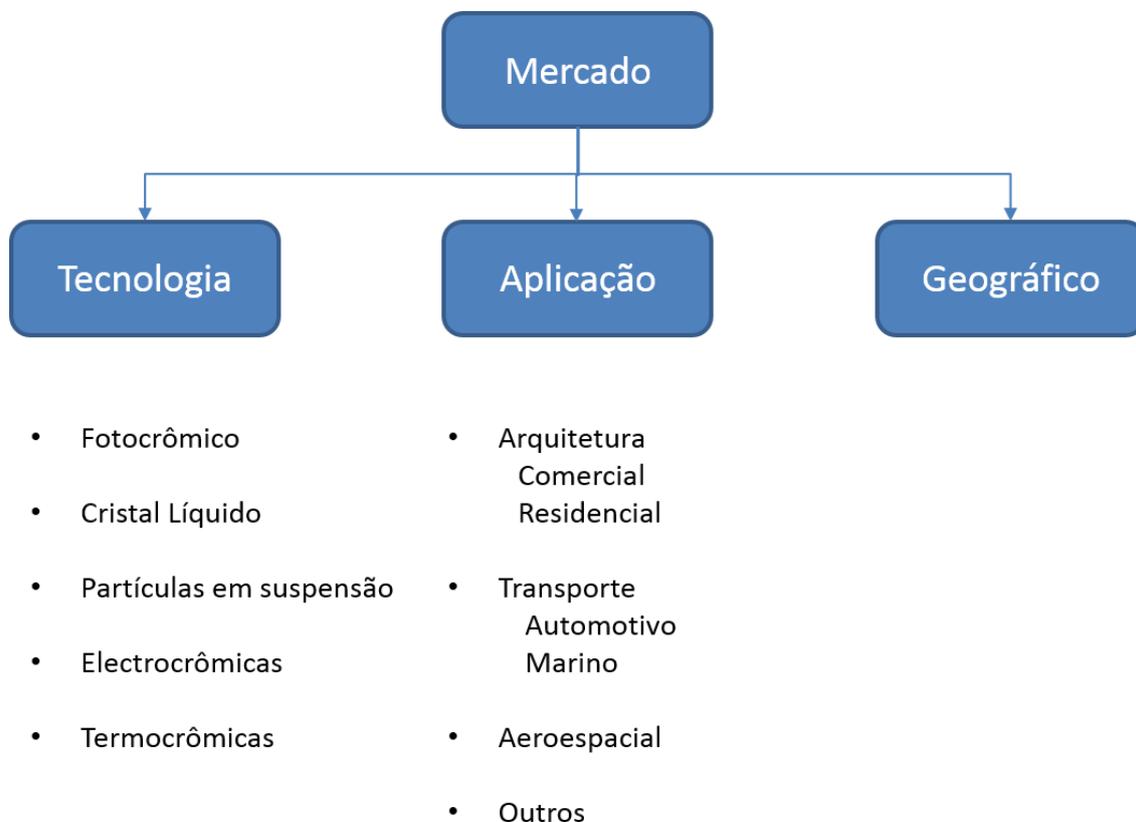
O próximo tópico abordará, de uma forma geral, como se encontra o mercado comercial das janelas eletrocromicas, as principais empresas que atuam na área, o crescimento da pesquisa e desenvolvimento destes dispositivos, o qual pode ser observado pelo número crescente de patentes, dentre outros pontos a serem abordados.

### 3. Mercado das Janelas Eletrocromicas

A primeira aplicação de janelas inteligentes foi em 1986, mas não conseguiu ser comercializada em grande escala até a metade do ano 2000. A eficiência energética e o controle de privacidade “sobre demanda”

que as janelas inteligentes oferecem, juntamente com o aumento nas áreas onde é possível aplicar esta tecnologia, como por exemplo, o automotivo, está permitindo um rápido crescimento do mercado a respeito deste tipo de tecnologia. Ao mesmo tempo, o alto custo de produção, uma cadeia de valor complexa e a ameaçadora crise econômica na zona do euro são alguns dos desafios e forças restritivas para o mercado.

O mercado global de janelas inteligentes cobre todo o mercado de janelas comercializados até agora. O mercado pode ser analisado por tipos de tecnologia, por aplicações destas tecnologias em diferentes setores, e por sua aplicação geográfica e penetração. A Figura 11 mostra uma classificação, do ponto de vista do mercado das janelas inteligentes.



**Figura 11.** Classificação do mercado de janelas inteligentes

Mais especificamente, verifica-se o que o mercado de janelas eletrocromicas está liderado pelas seguintes empresas: Sage Electrochromics (EUA), Research Frontiers (EUA), Saint Gobain (EUA), Citala (Israel), SmartGlass International Ltd (Reino Unido), Domoticware (Espanha), RavenBrick, LLC (EUA), Gentex Corporation (EUA), Corning (EUA), e SPD Control Systems (EUA).

Embora esperava-se uma adoção generalizada de janelas inteligentes como

"iminente" para a última década, as previsões ainda não se concretizaram. No entanto, o segmento se prepara para o crescimento sem precedentes, segundo especialistas do setor, empresas de consultoria e jornais econômicos, tais como Stephen Selkowitz (chefe do Departamento de Tecnologias de Construção do *Lawrence Berkeley National Laboratories*) Pike Reserach, NanoMarkets, Forbes (Figura 12), entre outros.

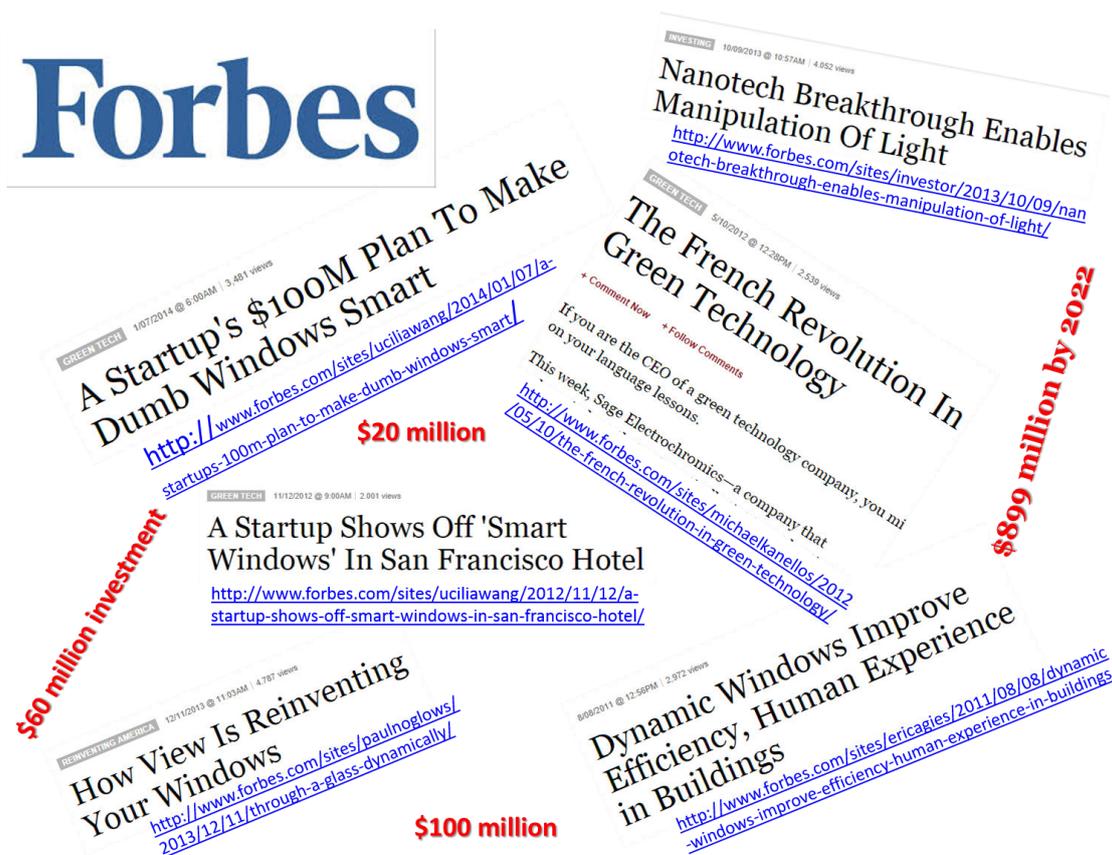


Figura 12. Exemplos de matérias publicadas na revista Forbes entre 2011 e 2014 sobre investimentos na área de janelas inteligentes

#### 4. Considerações finais

O uso de janelas eletrocromicas inteligentes está sendo considerada uma das mais promissoras formas de economia de energia atualmente. Neste sentido, há muito a se ganhar com o desenvolvimento de tecnologias para regular os fluxos de energia

solar e luminosidade com gastos energéticos mínimos, com o uso das janelas eletrocromicas inteligentes.

Uma janela inteligente perfeita é aquela que se adequa às diferentes estações do ano, principalmente ao verão e ao inverno de uma dada região. Os exemplos apresentados, e outros tais como a biblioteca da *Colorado State University*, o W Hotel (San Francisco,

U.S.) e o Kimmel Center (Philadelphia, U.S.), mostram que estágio atual de comercialização e adoção de janelas eletrocromicas está indicando que o mercado atingiu uma massa crítica.

O futuro parece brilhante para a indústria de janelas inteligente. Nos últimos anos os fabricantes anunciam novas instalações, parcerias, melhorias tecnológicas e aquisições de financiamento. Lamentavelmente, esses investimentos ainda estão focados principalmente nos Estados Unidos e Europa. Aqui, no Brasil, ainda temos muito caminho a percorrer.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, PROPP-UFF e FAPERJ (Processo E-26/102.971/2012) pelo auxílio financeiro. Renato Soares de Oliveira agradece a CAPES pela bolsa de doutorado concedida.

## Referências Bibliográficas

<sup>1</sup> Arrhenius, S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine* **1896**, *41*, 237. [CrossRef]

<sup>2</sup> Sítio do *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC. Disponível em: <[http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf)>. Acesso em: 10 agosto 2014.

<sup>3</sup> Kamalisarvestani, M.; Saidur, R.; Mekhilef, S.; Javadi, F. S. Performance, materials and coating technologies of thermochromic thin films on smart windows. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* **2013**, *26*, 353. [CrossRef]

<sup>4</sup> Sítio do Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticode>

[EnergiaEletrica/20130909\\_1.pdf](#)>. Acesso em: 10 agosto 2014.

<sup>5</sup> Svensson, J. S. E. M.; Granqvist, C. G. Electrochromic coatings for "smart windows". *Solar Energy Materials and Solar Cells* **1985**, *12*, 391. [CrossRef]

<sup>6</sup> Sítio do Lawrence Berkeley National Laboratory. Disponível em: <[http://windows.lbl.gov/comm\\_perf/Electrochromic/refs/CEC-500-2006-052\\_FinalReport.pdf](http://windows.lbl.gov/comm_perf/Electrochromic/refs/CEC-500-2006-052_FinalReport.pdf)>. Acesso em: 10 agosto 2014.

<sup>7</sup> Sítio do *U. S. Department of Energy*. Disponível em: <[http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/docs%5CDataBooks%5C2011\\_BEDB.pdf](http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/docs%5CDataBooks%5C2011_BEDB.pdf)>. Acesso em: 10 agosto 2014.

<sup>8</sup> Sítio do *Eco business*. Disponível em <<http://www.eco-business.com/opinion/smart-windows-open-new-opportunities-for-energy-savings/>>. Acesso em: 10 agosto 2014.

<sup>9</sup> Sítio do *SageGlass*. Disponível em <<http://sageglass.com/portfolio/>>. Acesso em: 10 agosto 2014.

<sup>10</sup> Granqvist, C. G. Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices. *Thin Solid Films* **2014**, *564*, 1. [CrossRef]

<sup>11</sup> Lampert, C. M. Electrochromic materials and devices for energy efficient windows. *Solar Energy Materials* **1984**, *11*, 1. [CrossRef]

<sup>12</sup> Svensson, J. S. E. M.; Granqvist, C. G. Electrochromic tungsten oxide films for energy efficient windows. *Solar Energy Materials* **1984**, *11*, 29. [CrossRef]

<sup>13</sup> Svensson, J. S. E. M.; Granqvist, C. G. Electrochromic Coatings For "Smart Windows". *Proceedings of SPIE* **1984**, *502*, 30. [CrossRef]

<sup>14</sup> Svensson, J. S. E. M.; Granqvist, C. G. Electrochromic coatings for "smart windows". *Solar Energy Materials* **1985**, *12*, 391. [CrossRef]

<sup>15</sup> Svensson, J. S. E. M.; Granqvist, C. G. Electrochromic coatings for smart windows:

- Crystalline and amorphous WO<sub>3</sub> films. *Thin Solid Films* **1985**, 126, 31. [CrossRef]
- <sup>16</sup> Sítio do Paraná Online. Disponível em <<http://www.parana-online.com.br/canal/automoveis/news/126205/>>. Acesso em: 10 agosto 2014.
- <sup>17</sup> Sítio do informitv. Disponível em <<http://informitv.com/2005/10/14/printed-plastic-screens-offer-low-cost-colour-displays/>>. Acesso em: 10 agosto 2014.
- <sup>18</sup> Bechinger, C.; Ferrere, S.; Zaban, A.; Sprague, J.; Gregg, B. A. Photoelectrochromic windows and displays. *Nature* **1996**, 383, 608. [CrossRef]
- <sup>19</sup> Deb, S. K.; Lee, S. H.; Tracy, C. E.; Pitts, J. R.; Gregg, B. A.; Branz, H. M. Stand-alone photovoltaic-powered electrochromic smart window. *Electrochimica Acta* **2001**, 46, 2125 [CrossRef]
- <sup>20</sup> Hauch, A.; Georg, A.; Baumgartner, S.; Opara Krasovec, U.; Orel, B. New photoelectrochromic device. *Electrochimica Acta* **2001**, 46, 2131. [CrossRef]
- <sup>21</sup> Ahn, K.-S.; Yoo, S. J.; Kang, M.-S.; Lee, J.-W.; Sung, Y.-E. Tandem dye-sensitized solar cell-powered electrochromic devices for the photovoltaic-powered smart window. *Journal of Power Sources* **2007**, 168, 533. [CrossRef]
- <sup>22</sup> Gao, W.; Lee, S. H.; Bullock, J.; Xu, Y.; Benson, D. K.; Morrison, S.; Branz, H. M. First a-SiC:H photovoltaic-powered monolithic tandem electrochromic smart window device. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **1999**, 59, 243. [CrossRef]
- <sup>23</sup> Jensen, J.; Dam, H. F.; Reynolds, J. R.; Dyer, A. L.; Krebs, F. C. Manufacture and demonstration of organic photovoltaic-powered electrochromic displays using roll coating methods and printable electrolytes. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* **2012**, 50, 536. [CrossRef]
- <sup>24</sup> Dyer, A. L.; Bulloch, R. H.; Zhou, Y.; Kippelen, B.; Reynolds, J. R.; Zhang, F. A Vertically Integrated Solar-Powered Electrochromic Window for Energy Efficient Buildings. *Advanced Materials* **2014**, 26, 4895. [CrossRef]
- <sup>25</sup> Bazito, F. F. C.; Fiorito, P. A.; Ponzio, E. A.; Vidotti, M.; Torresi, S. I. C.; Toresi, R. M. in *Handbook of organic electronics and photonics: Nanostructural arrays as suitable materials for batteries, sensors and electrochromic devices*; Nalwa, H.S. eds.; Stevenson Ranch: California, 2007; cap. 2. [Link]
- <sup>26</sup> Oliveira, M. R. S.; Mello, D. A. A.; Oliveira, R. S.; Ponzio, E. A.; C., O. S. In *Advances in Nanotechnology*; Trenor, Z. B. a. J., eds.; Nova Publishers: New York, 2011; cap. 1. [Link]
- <sup>27</sup> Oliveira, R. S.; Alves, W. A.; Ponzio, E. A. Spectroelectrochemical Study of the Hybrid between Vanadium Oxide and Carboxybenzylviologen for Application in Electrochromic Electrodes. *ECS Transactions* **2012**, 43, 363. [CrossRef]
- <sup>28</sup> Oliveira, R. S.; Oliveira, M. R. S.; Oliveira, S. C.; Ponzio, E. A. Materiais Eletrocromicos Orgânicos: Uma Breve Revisão de Viológenos, Ftalocianinas e Alguns Complexos de Metais de Transição. *Revista Virtual de Química* **2013**, 5, 596 [Link]
- <sup>29</sup> More, A. J.; Patil, R. S.; Dalavi, D. S.; Mali, S. S.; Hong, C. K.; Gang, M. G.; Kim, J. H.; Patil, P. S. Electrodeposition of nano-granular tungsten oxide thin films for smart window application. *Materials Letters* **2014**, 134, 298. [CrossRef]
- <sup>30</sup> Cheng, C.-P.; Kuo, Y.; Cheng, C.-H.; Zheng, Z.-W. Operation mechanism investigation of electrochromic display devices using tungsten oxides based on solid-state metal-oxide-metal capacitor structures. *Solid-State Electronics* **2014**, 99, 16. [CrossRef]
- <sup>31</sup> Hsu, C.-S.; Chan, C.-C.; Huang, H.-T.; Peng, C.-H.; Hsu, W.-C. Electrochromic properties of nanocrystalline MoO<sub>3</sub> thin films. *Thin Solid Films* **2008**, 516, 4839. [CrossRef]
- <sup>32</sup> Zhang, Y.; Kuai, S.; Wang, Z.; Hu, X. Preparation and electrochromic properties of Li-doped MoO<sub>3</sub> films fabricated by the peroxo sol-gel process. *Applied Surface Science* **2000**, 165, 56. [CrossRef]
- <sup>33</sup> Romero, R.; Dalchiele, E. A.; Martín, F.; Leinen, D.; Ramos-Barrado, J. R.

- Electrochromic behaviour of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films with different morphologies obtained by spray pyrolysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **2009**, *93*, 222. [CrossRef]
- <sup>34</sup> Huang, Y.; Zhang, Y.; Hu, X. Structural, morphological and electrochromic properties of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films deposited by reactive sputtering. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **2003**, *77*, 155. [CrossRef]
- <sup>35</sup> Bodurov, G.; Stefchev, P.; Ivanova, T.; Gesheva, K. Structural, morphological and electrochromic properties of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films deposited by reactive sputtering. *Materials Letters* **2014**, *117*, 270. [CrossRef]
- <sup>36</sup> Pereira, S.; Gonçalves, A.; Correia, N.; Pinto, J.; Pereira, L.; Martins, R.; Fortunato, E. Electrochromic behavior of NiO thin films deposited by e-beam evaporation at room temperature. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **2014**, *120*, 109. [CrossRef]
- <sup>37</sup> Soltane, L.; Sediri, F. Hydrothermal synthesis and characterization of mesoporous rod-like hybrid organic-inorganic nanocrystalline based vanadium oxide. *Ceramics International* **2013**, *40*, 1531. [CrossRef]
- <sup>38</sup> Taufiq-Yap, Y. H.; Wong, Y. C.; Zainal, Z.; Hussein, M. Z. Synthesis of self-assembled nanorod vanadium oxide bundles by sonochemical treatment. *Journal of Natural Gas Chemistry* **2009**, *18*, 312. [CrossRef]
- <sup>39</sup> Basova, T.; Gürek, A. G.; Ahsen, V.; Ray, A. Electrochromic lutetium phthalocyanine films for in situ detection of NADH. *Optical Materials* **2013**, *35*, 634. [CrossRef]
- <sup>40</sup> Lin, C.-L.; Lee, C.-C.; Ho, K.-C. Spectroelectrochemical studies of manganese phthalocyanine thin films for applications in electrochromic devices. *Journal of Electroanalytical Chemistry* **2002**, *524*, 81. [CrossRef]
- <sup>41</sup> Sanchez, C.; Julian, B.; Belleville, P.; Popall, M. Applications of hybrid organic-inorganic nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry* **2005**, *15*, 3559. [CrossRef]
- <sup>42</sup> Jelle, B. P.; Hagen, G.; Noedland, S. Transmission spectra of an electrochromic window consisting of polyaniline, prussian blue and tungsten oxide. *Electrochimica Acta* **1993**, *38*, 1497. [CrossRef]
- <sup>43</sup> Lee, K.; Kim, A. Y.; Park, J. H.; Jung, H.-G.; Choi, W.; Lee, H. Y.; Lee, J. K. Effect of micro-patterned fluorine-doped tin oxide films on electrochromic properties of Prussian blue films. *Applied Surface Science* **2014**, *313*, 864. [CrossRef]
- <sup>44</sup> Nossol, E.; Zabin, A. J. G. Electrochromic properties of carbon nanotubes/Prussian blue nanocomposite films. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **2013**, *109*, 40. [CrossRef]
- <sup>45</sup> Silva, R. C.; Sarmiento, M. V.; Nogueira, F. A. R.; Tonholo, J.; Mortimer, R. J.; Faez, R.; Ribeiro, A. S. Enhancing the electrochromic response of polyaniline films by the preparation of hybrid materials based on polyaniline, chitosan and organically modified clay. *RSC Advances* **2014**, *4*, 14948. [CrossRef]
- <sup>46</sup> Wei, H.; Zhu, J.; Wu, S.; Wei, S.; Guo, Z. Electrochromic polyaniline/graphite oxide nanocomposites with endured electrochemical energy storage. *Polymer* **2013**, *54*, 1820. [CrossRef]
- <sup>47</sup> Wei, H.; Yan, X.; Wu, S.; Luo, Z.; Wei, S.; Guo, Z. Electropolymerized Polyaniline Stabilized Tungsten Oxide Nanocomposite Films: Electrochromic Behavior and Electrochemical Energy Storage. *The Journal of Physical Chemistry C* **2012**, *116*, 25052. [CrossRef]
- <sup>48</sup> Wang, G.; Zhao, J.; Li, X.; Li, C.; Yuan, W. Synthesis and characterization of electrically conductive and fluorescent poly(N-[5-(8-hydroxyquinoline)methyl]aniline)/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> xerogel hybrids. *Synthetic Metals* **2009**, *159*, 366. [CrossRef]
- <sup>49</sup> Guerra, E. M.; Ciuffi, K. J.; Oliveira, H. P. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> xerogel-poly(ethylene oxide) hybrid material: Synthesis, characterization, and electrochemical properties. *Journal of Solid State Chemistry* **2006**, *179*, 3814. [CrossRef]

- <sup>50</sup> Wu, C.-G.; Chung, M.-H. Water-soluble poly(2-(3thienyloxy)ethanesulfonic acid)/V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>nanocomposites: synthesis and electrochromic properties. *Journal of Solid State Chemistry* **2004**, *177*, 2285. [[CrossRef](#)]
- <sup>51</sup> He, L.; Wang, G.; Tang, Q.; Gong, C.; Fu, X. K. Synthesis and characterization of novel electrochromic and photoresponsive materials based on azobenzene-4,4'-dicarboxylic acid dialkyl ester. *Journal of Materials Chemistry C* **2014**, *2*, 8162. [[CrossRef](#)]
- <sup>52</sup> Argun, A. A.; Aubert, P.-H.; Thompson, B. C.; Schwendeman, I.; Gaupp, C. L.; Hwang, J.; Pinto, N. J.; Tanner, D. B.; MacDiarmid, A. G.; Reynolds, J. R. Multicolored Electrochromism in Polymers: Structures and Devices. *Chemistry of Materials* **2004**, *16*, 4401. [[CrossRef](#)]
- <sup>53</sup> Granqvist, C. G.; Azens, A.; Hjelm, A.; Kullman, L.; Niklasson, G. A.; Ronnow, D.; Stromme Mattsson, M.; Veszelei, M.; Vaivars, G. Recent advances in electrochromics for smart windows applications. *Solar Energy* **1998**, *63*, 199. [[CrossRef](#)]
- <sup>54</sup> Ye, H.; Meng, X.; Xu, B. Theoretical discussions of perfect window, ideal near infrared solar spectrum regulating window and current thermochromic window. *Energy and Buildings* **2012**, *49*, 164. [[CrossRef](#)]
- <sup>55</sup> Ye, H.; Meng, X.; Long, L.; Xu, B. The route to a perfect window. *Renewable Energy* **2013**, *55*, 448. [[CrossRef](#)]
- <sup>56</sup> Tavares, P. F.; Gaspar, A. R.; Martins, A. G.; Frontini, F. Evaluation of electrochromic windows impact in the energy performance of buildings in Mediterranean climates. *Energy Policy* **2014**, *67*, 68. [[CrossRef](#)]
- <sup>57</sup> Kim, S.; Kong, X.; Taya, M. Electrochromic windows based on anodic electrochromic poly(mesitylenes) containing 9H-carbazole-9-ethanol moieties. *Solar Energy Materials and Solar Cells* **2013**, *117*, 183. [[CrossRef](#)]
- <sup>58</sup> Monk, P. M. S.; Mortimer, R. J.; Rosseinsky, D. R. *Electrochromism and Electrochromic Devices*; Cambridge University Press, 2007. [[CrossRef](#)]
- <sup>59</sup> Syrrakou, E.; Papaefthimiou, S.; Yianoulis, P. Eco-efficiency evaluation of a smart window prototype. *Science of the Total Environment* **2006**, *359*, 267. [[CrossRef](#)]
- <sup>60</sup> Lampert, C. M. Durability of electrochromic switching devices for glazings. *The International Society of Optics and Photonics* **1990**, *1272*, 174. [[CrossRef](#)]
- <sup>61</sup> Sottile, G. M. 2004 Survey of United States architects on the subject of switchable glazings. *Materials Science and Engineering: B* **2005**, *B119*, 240. [[CrossRef](#)]
- <sup>62</sup> Sottile, G. M. Cleantech Daylighting Using Smart Glass: A Survey of LEED® Accredited Professionals. *Annual Technical Conference Proceeding Society of Vacuum Coaters* **2008**, *51*, 107. [[Link](#)]