

Materiais transparentes e translúcidos inovadores em fachadas e seu desempenho em iluminação natural: panorama internacional e aplicabilidade no contexto brasileiro

Transparent and translucent materials on facades and their performance in natural lighting: an overview of the international context and applicability in Brazil

João Francisco Walter Costa 
Cláudia Naves David Amorim 

Resumo

Desde a década de 1980, materiais transparentes e translúcidos inovadores foram desenvolvidos como tentativa de resolver problemas térmicos e luminosos causados pelas superfícies envidraçadas. Neste contexto, o artigo tem como objetivo apresentar um panorama sobre materiais transparentes e translúcidos inovadores empregados em fachadas de edifícios não residenciais, descrevendo quais podem ser promissores em climas brasileiros. Por meio da revisão sistemática de literatura, incluindo artigos em periódicos, relatórios, teses e dissertações, discute-se uma visão relativa aos principais materiais inovadores, que se dividem em duas categorias principais: os sistemas de redirecionamento da luz natural e as janelas inteligentes. Identifica-se que o vidro eletrocromico se destaca em relação às demais janelas inteligentes pela maior capacidade de controle das propriedades de transmissão luminosa e fator solar. Na categoria de sistemas de redirecionamento da luz natural, os componentes óticos microestruturados são promissores por permitirem maior alcance da luz natural na profundidade dos ambientes em relação a outros sistemas. Conclui-se que ainda há poucos estudos de aplicação desses materiais no Brasil e, por isso, o aprofundamento desta discussão é necessário.

Palavras-chave: Materiais transparentes e translúcidos. Janelas inteligentes. Sistemas de redirecionamento da luz. Eficiência energética.

Abstract

Since the 1980s, innovative transparent and translucent material technologies have been developed as a solution for issues related to thermal and luminous comfort caused by glazed facades. In this context, this article aims to present an overview of the innovative transparent and translucent materials employed on non-residential building facades, describing those which can be promising in Brazilian climates. Through the literature review, including journal articles, technical reports, theses and dissertations an overview of the main innovative materials is discussed. They can be divided into two categories: smart windows and light redirection systems. The electrochromic glazing stands out from other smart window technologies due its wider range of Solar-Heating Gain Coefficient and Light Transmission control. The micro-structured optical components are a promising technology because they allow a deeper reach of natural light into the depth of indoor environments. The conclusion of this paper is that there are still only few studies testing the applicability of these innovative materials in Brazil and that further studies are needed.

¹João Francisco Walter Costa
¹Universidade de Brasília
Brasília - DF - Brasil

²Cláudia Naves David Amorim
²Universidade de Brasília
Brasília - DF - Brasil

Recebido em 14/12/21
Aceito em 28/02/22

Keywords: Innovative translucent and transparent materials. Smart windows. Light redirection systems. Energy efficiency.

Introdução

A iluminação foi responsável por 15% do consumo de energia elétrica mundial (INTERNATIONAL..., 2020) e o ar-condicionado por 20% em 2018¹. Edifícios não residenciais, nesse contexto, têm grande peso no consumo de energia elétrica, uma vez que, no Brasil, cerca de 21% de energia elétrica é consumida por essas edificações. Quanto aos usos finais, de acordo com o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, cerca de 22% a 30% do consumo energético total das edificações destina-se à iluminação e de 40% a 46% ao ar-condicionado (MINISTÉRIO..., 2008, 2020).

Gonçalves *et al.* (2021) ressaltam que edifícios não residenciais apresentam a tendência de aumentar a demanda energética em até 20% até 2050, em um futuro de mudanças climáticas e consequente aquecimento do clima urbano. Contudo, esses edifícios apresentam grande potencial de economia energética de até 50%, quando estratégias bioclimáticas – considerando a forma da edificação, a envoltória (composição da fachada), a orientação das aberturas, a ventilação, o sombreamento, etc. – são levadas em conta, proporcionando aos ambientes internos acesso à luz e ventilação natural, vista exterior, o que aumenta também o conforto e o bem-estar dos ocupantes.

Nesse contexto, o uso intenso do vidro em fachadas tem influência no aumento do consumo energético para iluminação e ar-condicionado (ALVES *et al.*, 2017; GONÇALVES *et al.*, 2020; COSTA; AMORIM; SILVA, 2020). Fabbrini (2020) faz uma ligação importante entre a Arquitetura Moderna e Contemporânea em relação ao uso do vidro. Embora haja diferenças nos tipos e nas tecnologias, o uso de fachadas envidraçadas esteve presente especialmente na arquitetura não residencial, com origem de sua aplicação no Modernismo. Na arquitetura moderna, o vidro transparente era empregado, principalmente nas décadas de 1950 e 1960, com o objetivo de preservar o princípio de transparência entre interior e exterior. Já nas décadas de 1980 a 2000, houve intenso uso de vidros espelhados, refletivos e translúcidos leitosos,² tornando-se símbolo da arquitetura corporativa. Essa tendência se repete na arquitetura contemporânea (BROTO, 2011). O uso de fachadas envidraçadas em edifícios em climas quentes causa problemas, como o ofuscamento e o aquecimento excessivo dos ambientes, acarretando o aumento do consumo de ar-condicionado devido à incidência de radiação solar direta absorvida pelas janelas (BAHAJ; JAMES; JENTSCH, 2008; TOUMA; OUAHRANI, 2017).

Gonçalves (2019, p. 5) afirma que “[...] o edifício da caixa de vidro introduziu o cenário das condições ambientais restritas a uma variação estreita de temperatura do ar justificado pelo conceito de conforto térmico proposto por Fanger (em 1972), com o índice de *Predicted Mean Vote* [...]”. Para atingir essa faixa de conforto – em torno de 22 °C –, sistemas de condicionamento mecânico do ar eram necessários. Foi nesse momento também que o modelo de edifícios de escritórios do tipo caixa de vidro foi popularizado mundialmente.

Segundo Gonçalves *et al.* (2021), o mercado de edifícios de escritórios dispõe de vidros comercializados como eficientes no controle da radiação solar, englobando diferentes tipos coloridos, incluindo os refletivos, os vidros duplos, triplos e quádruplos. No entanto, o uso dessas tecnologias de vidro é recomendado com cautela em climas tropicais. O alto isolamento térmico dos vidros duplos e com múltiplas camadas não é adequado para a envoltória de edifícios em climas quentes, pois neles a radiação solar é a variável de maior impacto nos ambientes internos, em vez da temperatura do ar externo, como em climas frios. Além disso, esses produtos geralmente são mais caros³.

Lima e Caram (2015) avaliaram sistemas de janela para suporte a decisões de projeto buscando o equilíbrio entre ganhos de luz e calor. No estudo foram testados três vidros: refletivo prata a vácuo, vidro comum cinza e comum incolor em ambiente de escritório na cidade de Maceió, Alagoas. Além disso, as autoras consideraram o uso de proteção solar e três percentuais de abertura envidraçada diferentes (25%, 50% e 75%). Segundo as autoras, o vidro refletivo combinado com áreas de aberturas médias e grandes só é superior aos demais tipos de vidro estudados se houver proteção solar e, mesmo assim, apenas com relação ao critério de uniformidade de iluminação.

¹Mais informações em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>.

²De acordo com Fabbrini (2020, p. 9), os vidros leitosos na arquitetura corporativa foram empregados no intuito de negar e criticar o princípio da transparência da arquitetura moderna, “velando ou distorcendo o que é visto”. O vidro leitoso, no entanto, não tem propriedades como os vidros refletivos ou espelhados, que refletem parte da radiação solar, diminuindo os efeitos térmicos negativos em climas quentes, tendo, portanto, menor eficácia nesse sentido.

³Cebrace: linhas de vidro para obras comerciais, disponível em: <https://www.cebrace.com.br/#!/produtos/obras-comerciais>. SAGE Glass, disponível em: <https://www.sageglass.com/en/products>.

O uso excessivo de vidro nas fachadas é identificado em vários estudos brasileiros. Em Belo Horizonte, no levantamento de 298 edifícios de escritórios, Alves *et al.* (2017) identificaram que, a partir da década de 2000, o tipo predominante apresentava valores de percentual de área de abertura envidraçada na fachada (PAF) de 50% nas quatro fachadas. Esse fator, segundo os autores, contribuiu para o aumento do consumo energético para o ar-condicionado e a iluminação devido a problemas relacionados a superaquecimento dos ambientes internos e ocorrências de ofuscamento.

Estudos evidenciam também aumento da tipologia de edifícios envidraçados em Brasília. Em um levantamento de 267 edifícios de escritórios em Brasília, foi verificado que em quase 67% dos edifícios não havia a presença de proteções solares e quase metade deles tinha valores de PAF maiores que 75% (COSTA; AMORIM; SILVA, 2020). Assim, a tipologia predominante é da “caixa de vidro”, com a ocorrência de problemas semelhantes aos de Belo Horizonte. Verifica-se forte tendência nesse sentido, inclusive após os *retrofits* desses edifícios, dos quais proteções solares externas são retiradas e substituídas por fachadas envidraçadas (AMORIM *et al.*, 2021).

Gonçalves (2019, p. 9) destaca que o uso de fachadas envidraçadas e plantas baixas com ambientes profundos segue a fórmula econômica que “[...] rege a produção do edifício de escritório convencional caracterizada pelos seguintes fatores: maior área útil interna possível para área total construída, além da menor área de fachada para a maior área de planta e da simplória fachada de vidro [...]”. Além disso, as janelas, tendo como elemento principal o vidro, também são responsáveis por atributos importantes para o bem-estar do usuário, como a presença de luz natural e vista exterior, com efeitos visuais e não visuais – ciclo circadiano (INTERNATIONAL..., 2021a). Assim, é essencial considerar a lógica econômica e os benefícios que as janelas, em especial o vidro, trazem para o usuário na formulação de diretrizes para a melhoria do conforto dos usuários e da eficiência energética.

Em vista disso, desde a década de 1980, novas tecnologias de materiais transparentes e translúcidos⁴ foram propostas para resolver os problemas causados pelas superfícies envidraçadas. Nesse cenário, as chamadas janelas inteligentes ganharam forte destaque (GRANQVIST, 2016). Materiais inovadores transparentes e translúcidos possibilitam o controle de radiação solar indesejada e são soluções futuras para o aumento da eficiência energética das edificações (JELLE *et al.*, 2012). De acordo com Dussault e Gosselin (2017), busca-se, por meio do emprego dos materiais inovadores em climas predominantemente quentes, a melhoria do conforto térmico, do conforto luminoso e do desempenho energético. Dúvidas surgem em relação à aplicação desses materiais em edifícios não residenciais no contexto brasileiro. A principal pergunta é se a distribuição da luz natural e o simultâneo controle da incidência de sol direto nos ambientes internos de edifícios não residenciais podem ser melhorados com a aplicação desses materiais.

O tópico principal da pesquisa compreende os materiais transparentes e translúcidos inovadores em edifícios não residenciais, os quais se inserem no conceito de “fachadas avançadas”, ainda sem um consenso. De acordo com Attia *et al.* (2018), o termo “fachada avançada” é caracterizado pela utilização de materiais inovadores na fachada dos edifícios – tanto materiais opacos quanto transparentes e translúcidos, por meio dos quais se busca melhorar o desempenho energético e o conforto dos usuários das edificações. Outro conceito descrito pelos mesmos autores é o termo “fachadas adaptativas”, que são envoltórias de edifícios capazes de se adaptar de acordo com a mudança de condições circundantes de curto prazo, que podem ser flutuações do tempo, ciclos diurnos (sol e condições de céu) e mudanças sazonais. Ressalta-se que os dois termos englobam os materiais opacos – utilizados para vedação, proteção solar, etc. – e os materiais transparentes e translúcidos – que são o âmago deste trabalho, com foco em edifícios não residenciais.

Nesse contexto, o presente artigo descreve estudos abordando materiais transparentes e translúcidos inovadores para fachadas, tendo como objetivo apresentar um panorama desses materiais para uso em fachadas de edifícios não residenciais, prospectando aqueles mais promissores para os climas brasileiros.

Método

O método empregado foi a revisão sistemática de literatura (KUGLEY *et al.*, 2016, 2017). De acordo com Cervo, Bervian e Silva (2007, p. 60), “[...] busca-se conhecer e analisar as contribuições culturais ou científicas do passado sobre determinado assunto, tema ou problema [...]”. Os materiais translúcidos e transparentes inovadores empregados em edifícios não residenciais foram o objeto da pesquisa. Buscou-se

⁴Segundo a definição da Comissão Internacional de Iluminação, o adjetivo “translúcido” se caracteriza quando o meio (material ou substância) transmite a maior parte da radiação visível de forma difusa, de modo que os objetos são vistos indistintamente através dele. Já o adjetivo “transparente” é a propriedade de um material ou substância por meio da qual os objetos podem ser vistos claramente através desse material ou substância (COMMISSION..., 2020).

com isso responder às seguintes questões: quais materiais foram abordados pelos autores? Em que contexto foram aplicados? E, por último, qual foi a contribuição de cada estudo selecionado? Os itens a seguir abordarão os detalhes da revisão sistemática realizada, que compreendeu a busca e a seleção dos artigos e a condução da revisão.

Revisão sistemática: bases de dados e palavras-chave

A pesquisa está alinhada com três tarefas da Agência Internacional de Energia (IEA) e do Solar Heating and Cooling Programme (SHC): *Tasks* 21, 50 e 61⁵. Pelo próprio alinhamento com as *Tasks* – IEA, foram lidos quatro relatórios da Agência Internacional de Energia (INTERNATIONAL..., 2000, 2016; MORODER *et al.*, 2021a, 2021b), que forneceram um panorama sobre os materiais transparentes e translúcidos inovadores⁶. Procurou-se em seguida por trabalhos acadêmicos utilizando as palavras-chave no recorte temporal entre 2000 e 2021. As bases de dados usadas foram Google Scholar, Scopus, SAGE e Web of Science.

A busca da revisão bibliográfica constituiu-se de oito levadas. As levadas 1 a 4 foram focadas em artigos em periódicos internacionais e a 5ª a 8ª na procura por trabalhos acadêmicos no Brasil. A leva 1 se deu a partir da inserção das palavras-chave “*innovative materials*”, “*facades*” e “*non-residential buildings and lighting*”. Na leva 2, foram usadas as palavras-chave “*advanced facade*”, “*advanced Building skin*” e “*adaptive facade systems*”. Com base nos resultados, houve a procura de materiais específicos – citados nos artigos encontrados das levadas 1 e 2 e nos dois relatórios lidos da IEA (INTERNATIONAL..., 2000, 2016). Assim, a 3ª e a 4ª leva de pesquisa consistiram na busca por meio da inserção das seguintes palavras-chave “*advanced building skin*”, “*smart windows*”, “*advanced building skin*”, “*light redirecting systems*”, “*prismatic panel*” e “*complex fenestration system*”.

Nas levadas 5 a 8, buscou-se a produção científica no Brasil em artigos, teses e dissertações em programas de pós-graduação reconhecidos pela Capes – Plataforma Sucupira nas levadas 5 e 8 (PLATAFORMA..., 2021). Procurou-se identificar quais grupos e universidades pesquisavam sobre o tema e em qual contexto os materiais translúcidos inovadores eram aplicados. Foram utilizadas as bases de dados Catálogo de Teses e Dissertações da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Portal de Periódicos Capes/MEC e Google Scholar com as seguintes palavras-chave nas levadas 5 e 6: “Brasil”, “Edifícios públicos”, “iluminação natural”, “vidro inovador”, “controle solar” e “fachadas” (leva 5) e “Brasil”, “Edifícios comerciais”, “iluminação natural”, “vidro inovador”, “controle solar” e “fachadas” (leva 6). Em seguida, foi necessário refinar a busca nas levadas 7 e 8, sendo inseridos os seguintes termos: “Brasil”, “Edifícios não residenciais”, “iluminação natural”, “Janelas inteligentes” e “sistemas de redirecionamento da luz natural”.

No total foram encontrados 32.310 resultados correspondendo às palavras-chave mencionadas. Então, o primeiro filtro foi realizado selecionando periódicos com classificação mínima de B2, de acordo com a Plataforma Sucupira da Capes – classificação de periódicos do quadriênio 2013–2016⁷. Além disso, o outro critério de classificação foi o fator de impacto superior a 2 e 0,299 de acordo com a avaliação de Clarivate Analytics e Scientific Journal Rankings, respectivamente, quando não havia classificação na Plataforma Sucupira⁸. Simultaneamente a esse filtro, foi selecionada a opção “ordenar os resultados por relevância”, mostrando os documentos mais citados e procurados nas primeiras páginas de exibição. Em seguida, outro critério de eliminação foi a leitura de títulos. O resumo era lido quando o título tinha relação com o tema. Esses filtros e critérios reduziram significativamente o número de documentos selecionados, chegando a um total de 214. A Tabela 1 resume as levadas de busca e a quantidade de documentos selecionados.

Seleção posterior para leitura e condução da revisão teórica

Posteriormente, os 214 trabalhos selecionados foram examinados, observando-se se o título e os resumos atendiam aos critérios de Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015, p. 189), conforme mostra o Quadro 1.

⁵IEA Task 21, disponível em: <https://task21.iea-shc.org/publications>.

IEA Task 50, disponível em: <https://task50.iea-shc.org/>.

IEA Task 61, disponível em: <https://task61.iea-shc.org/>.

⁶Estes relatórios fazem parte da literatura fugitiva (*grey literature*), definida como o que é produzido em documentos nos diversos níveis de governo, academia, negócios e indústria, impresso ou em meio eletrônico, mas não é controlado por editores comerciais (KUGLEY *et al.*, 2017).

⁷Mais informações em:

<https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/veiculoPublicacaoQualis/listaConsultaGeralPeriodicos.jsf>.

⁸Mais informações em: <https://www.scimagojr.com/journalrank.php> e <https://clarivate.com/webofsciencegroup/essays/impact-factor/>.

Tabela 1 - Levas de buscas da revisão bibliográfica e quantidade de documentos selecionados

Busca	Palavras-chave	Resultados iniciais	Documentos selecionados
1 ^a	<i>innovative materials, facades, non-residential buildings and lighting</i>	5.560	60
2 ^a	<i>advanced facade, advanced Building skin, adaptive facade systems</i>	2.760	44
3 ^a	<i>advanced building skin, light redirecting systems</i>	118	23
4 ^a	<i>advanced building skin, smart windows</i>	18.100	77
5 ^a	<i>Brasil, Edifícios públicos, iluminação natural, vidro inovador, controle solar, fachadas</i>	2.920	1
6 ^a	<i>Brasil, Edifícios comerciais, iluminação natural, vidro inovador, controle solar, fachadas</i>	2.500	2
7 ^a	<i>Brasil, Edifícios não residenciais, iluminação natural, janelas inteligentes</i>	206	2
8 ^a	<i>Brasil, edifícios não residenciais, sistemas de redirecionamento da luz natural</i>	146	5
Total		32.310	214

Quadro 1 - Critérios para avaliação das dimensões de qualidade de estudos primários

Dimensão	Qualidade da execução de estudo	Adequação à questão de revisão	Adequação ao foco da revisão
Alta	O estudo atende aos padrões exigidos para o tema de estudo.	O estudo aborda exatamente o assunto-alvo da revisão sistemática.	O estudo foi realizado em um contexto idêntico ao definido para a revisão.
Média	O estudo proposto possui lacunas em relação aos padrões exigidos para o tema em estudo.	O estudo aborda parcialmente o assunto da revisão sistemática.	O estudo foi realizado em um contexto semelhante ao definido para a revisão.
Baixa	O estudo proposto não está de acordo com os padrões exigidos para o estudo.	O estudo apenas tangencia o assunto da revisão sistemática.	O estudo foi realizado em um contexto diverso do definido para a revisão.

Fonte: adaptado de Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015, p. 192-193).

Essa análise abordou, portanto, três dimensões: a qualidade da execução de estudo, a adequação à questão de revisão e a adequação ao foco da revisão. Após a avaliação das três dimensões, foram selecionados os artigos e os documentos que se encontravam nos critérios classificados como qualidade alta e média.

Assim, dos 214 documentos inicialmente selecionados, 44 foram lidos integralmente, incluindo 22 artigos em periódicos, 3 teses, 3 dissertações e 10 outras publicações que incluíssem livros e relatórios. A revisão sistemática foi conduzida identificando-se a referência, os parâmetros e os focos do estudo. Em seguida, foi apontada a principal contribuição de cada estudo e evidenciados os tópicos não discutidos/abordados.

Resultados

Primeiramente, para fins de sistematização do conhecimento, é apresentada uma proposta de classificação dos materiais transparentes e translúcidos inovadores, em um contexto de fachadas avançadas. Como discutido no item 1, as “fachadas avançadas” são caracterizadas pela utilização de materiais inovadores. A partir da revisão teórica, são propostos dois grandes grupos: janelas inteligentes e sistemas de redirecionamento da luz.

Os autores Jelle *et al.* (2012) e Attia *et al.* (2018) definiram as janelas inteligentes como aquelas que apresentam propriedades de mudança de estado, sendo alterados por consequência a transmissão luminosa (TL) e o fator solar (FS) delas. Os autores incluíssem os vidros termo/foto/eletrocromicos, os de cristal líquido e de partículas suspensas na categoria de janelas inteligentes. Na nossa classificação, consideramos este o critério para a inclusão do grupo de “janelas inteligentes”.

Nos relatórios da IEA (INTERNATIONAL..., 2000, 2016), percebemos que houve grande ênfase na apresentação dos sistemas de redirecionamento da luz natural, além das janelas inteligentes. De acordo com a IEA (INTERNATIONAL..., 2000), de forma geral, as janelas convencionais iluminam o ambiente normalmente a uma profundidade de 1,5 a 2,0 vezes a altura da janela em relação ao piso. Os sistemas de redirecionamento da luz natural, por sua vez, são definidos como aqueles que conduzem a luz natural de maneira eficiente, guiando-a com mais profundidade e uniformidade com a razão de 2,0 vezes a altura da janela ou mais em relação ao piso. Frequentemente, esses sistemas fazem uso de tecnologias inovadoras. A utilização deles apresenta grande vantagem, uma vez que o alcance da luz natural nos ambientes de edifícios é ampliado. E, por isso, decidimos incluir este segundo grupo dentro da classificação de fachadas avançadas.

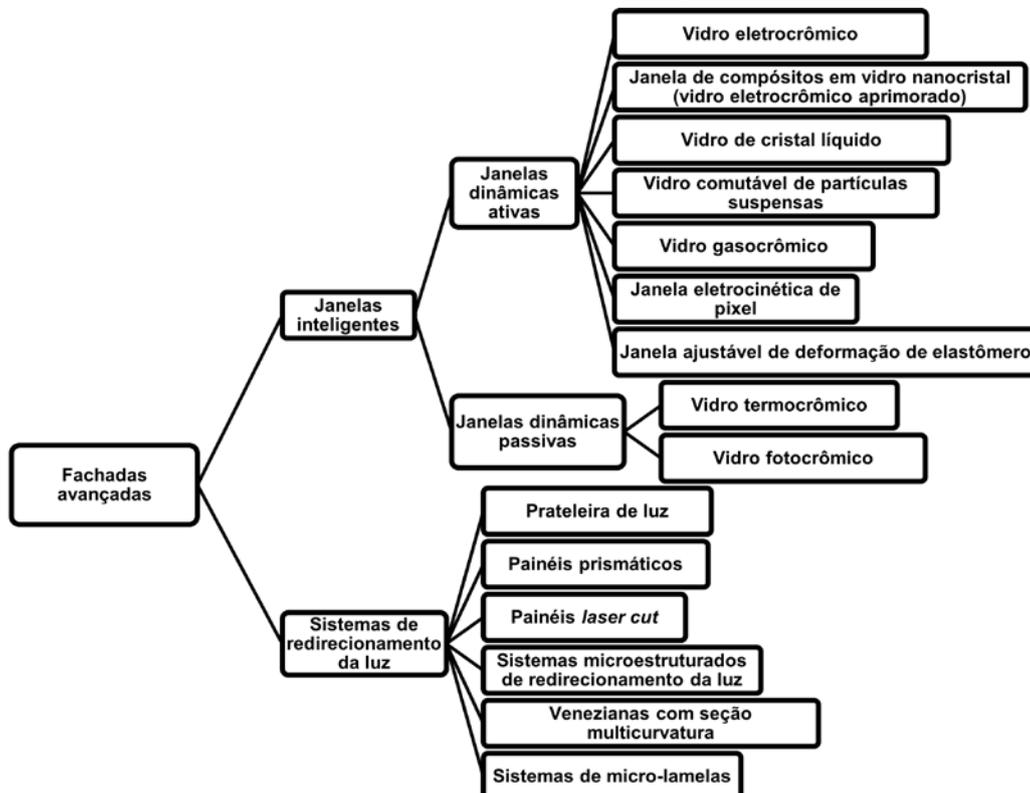
A classificação proposta divide as fachadas avançadas em duas grandes categorias: janelas inteligentes e sistemas de redirecionamento da luz (INTERNATIONAL..., 2016). Dentro da primeira categoria, distinguem-se dois grupos de janelas inteligentes. As janelas dinâmicas ativas respondem a estímulos elétricos externos, mudando suas características óticas e térmicas a partir de variações externas e internas ambientais ajustadas pelo usuário e, com isso, necessitando de aporte de energia elétrica para seu funcionamento. As janelas dinâmicas passivas respondem de forma autônoma por meio de estímulos naturais, como a luz e a radiação solar (vidro fotocromico) ou o calor (vidro termocromico), sem o ajuste e o controle dos usuários, não necessitando de aporte de energia elétrica para seu funcionamento (CASINI, 2018).

Na segunda categoria, de sistemas de redirecionamento da luz, seis diferentes tipos são identificados na literatura, sendo os sistemas microestruturados de redirecionamento da luz de desenvolvimento mais recente e os escolhidos para aprofundamento nesta revisão (MUELLER, 2019). Os demais tipos têm sido estudados em vários trabalhos anteriores, demonstrando algumas potencialidades, mas também restrições quanto ao uso em climas quentes (CIAMPINI, 2005; GARROCHO, 2005; CHAVES, 2012; CARVALHO, 2021).

Apresenta-se na Figura 1 a classificação proposta, baseada na revisão de literatura detalhada.

Embora tenha sido possível, através desta revisão de literatura, classificar os inúmeros tipos de sistemas e materiais existentes, a abordagem definida aqui aprofunda apenas o vidro eletrocromico, na categoria de janelas inteligentes e sistemas microestruturados, nos sistemas de redirecionamento da luz. Nos próximos itens, justifica-se a escolha do vidro eletrocromico dentro da categoria de janelas inteligentes e dos sistemas microestruturados nos sistemas de redirecionamento da luz natural para maior aprofundamento.

Figura 1 - Proposta de classificação dos materiais inovadores transparentes e translúcidos



Janelas inteligentes (*smart windows*): tecnologia, aplicação e aceitabilidade

As janelas são alvo de aprimoramento contínuo, por meio do qual se busca oferecer aos usuários dos edifícios aumento no aproveitamento da luz natural, no conforto térmico e no controle da radiação solar. As janelas inteligentes podem mudar suas propriedades de transmissão luminosa e fator solar e ajustar-se de acordo com as variações ambientais, internas e externas, além do controle do usuário (JELLE *et al.*, 2012). Dentro dessa categoria, há nove tecnologias, mencionadas na Figura 1. Dentro delas, o vidro eletrocromico se mostra bastante promissor devido ao maior controle das propriedades de transmissão luminosa e fator solar em relação às outras tecnologias de janelas inteligentes (JELLE *et al.*, 2012; CASINI, 2018). Além disso, essa tecnologia permite o controle dos usuários, aumentando a sua aceitabilidade, e está disponível comercialmente no mercado mundial em diversos catálogos, disponibilidade essa que não ocorre com as oito outras tecnologias (JELLE *et al.*, 2012; PAINTER *et al.*, 2016; CASINI, 2018; BOUBEKRI *et al.*, 2020). A primeira parte do item será a descrição do funcionamento das nove tecnologias de janelas inteligentes. Em função da sua consolidação no mercado e destaque em relação às demais tecnologias descritas, o vidro eletrocromico será aprofundado neste item.

A partir da década de 1980, três tecnologias foram desenvolvidas: os vidros termocrômico, fotocromico e eletrocromico. Os vidros termocrômicos interagem de maneira natural com a luz do sol, alterando a sua cor conforme são submetidos ao calor, de modo que quanto maior a incidência do sol, mais escuras as películas ficam. As lâminas que escurecem são compostas de dióxido de vanádio – VO₂ (SALAMATI *et al.*, 2019; TÄLLBERG *et al.*, 2019).

O vidro fotocromico modifica suas propriedades de transmissão luminosa e fator solar por meio da resposta pela incidência de radiação solar global – soma das radiações difusa e direta (W/m²) incidente no plano do vidro. Quanto maior for a radiação, mais escuro o vidro fica. O vidro permanece no estado “claro” com valores de radiação solar global abaixo de 100 W/m² e “escuro” com valores acima de 450 W/m². Os valores de fator solar variam de 48% a 31% e de transmissão luminosa de 73% a 13%, do estado “claro” para o estado “escuro”, respectivamente. O tempo de mudança leva entre 15 min e 20 min (TÄLLBERG *et al.*, 2019).

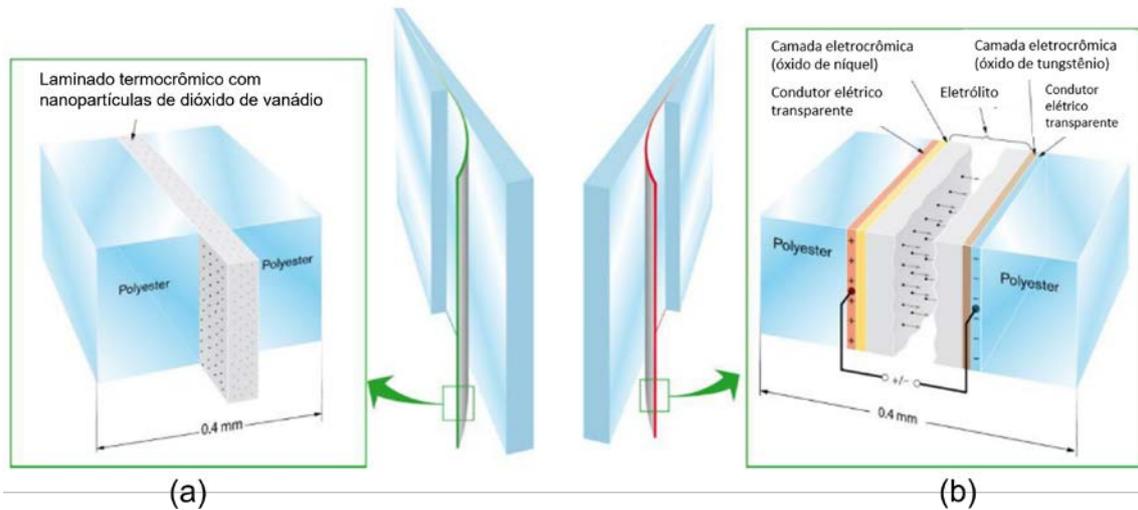
A mudança de estado “claro” para “escuro” dos vidros termocrômicos e eletrocômicos ocorre pela incidência do sol, não tendo os usuários controle sobre essa mudança, o que configura como a principal desvantagem na utilização de janelas dinâmicas passivas (CASINI, 2018). A seguir, são discutidas as janelas dinâmicas ativas.

O vidro eletrocromico é composto de camada de eletrólito transparente, como, por exemplo, um polímero condutor ou condutor iônico inorgânico e outras duas camadas de poliéster transparente. Esse elemento condutor está no centro e une dois filmes de óxido nano poroso, tipicamente de óxido de tungstênio (WO₂) e de níquel (NiO). Essa pilha de três camadas está localizada em dispositivos elétricos transparentes. A aplicação de uma tensão entre os condutores transparentes, tipicamente alguns volts, carrega a carga entre o óxido de tungstênio (WO₂) e o óxido de níquel (NiO). As propriedades óticas podem permanecer inalteradas – escuras, branqueadas ou intermediárias –, o que permite uma operação com alta eficiência energética. As alterações óticas são graduais e ocorrem a uma taxa que depende do tamanho do dispositivo. Uma área de alguns centímetros quadrados pode escurecer e alvejar em segundos, enquanto o tempo de resposta pode ser de dezenas de minutos para uma grande vidraça (GRANQVIST, 2016). A Figura 2 mostra a composição dos sistemas de vidros termocrômicos e eletrocômicos. Ressalta-se que as camadas em que o eletrocromismo ocorre – mudança de estados – não são necessariamente de vidro. No entanto, a vedação na grande maioria das vezes é feita por camadas de vidro nas partes externas – até mesmo para fins de proteção.

Como mostra a Figura 3, o vidro eletrocromico é composto de três estados: claro (ou brilhante), resfriamento e escuro. No estado “claro” ou “brilhante”, o vidro funciona como os outros comuns em que as radiações, infravermelha e visível, passam. No estado de “resfriamento”, parte da radiação infravermelha passa e parte é refletida. Por fim, no estado “escuro”, as três radiações são majoritariamente refletidas (infravermelha, ultravioleta e espectro visível), sendo pequena parte absorvida. A radiação ultravioleta é refletida nos três estados.

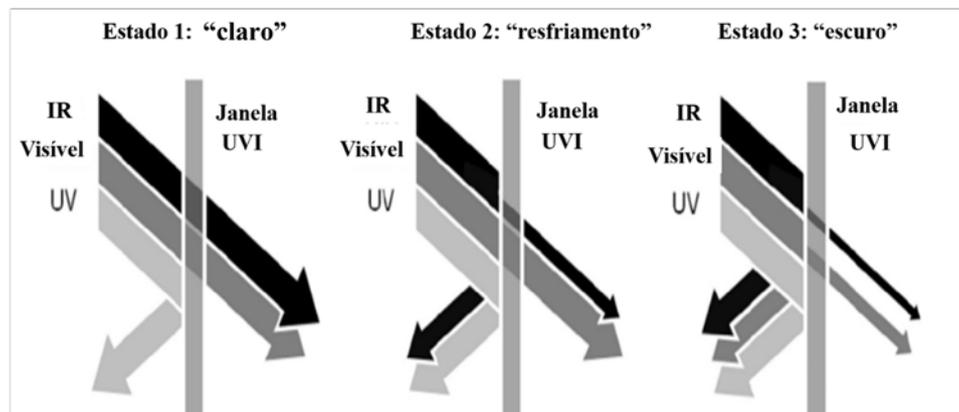
Janelas de compósitos em vidro nanocristal são compostas de nanocristais de óxido de estanho de índio (ITO) embutidos em uma matriz vítrea de óxido de nióbio (NbOx). O funcionamento é semelhante ao vidro eletrocromico, apresentando os estados “claro” (TL = 93%/FS = 91%), “resfriamento” (TL = 54%/FS = 16%) e “escuro” (TL = 22%/FS = 7%) de acordo com a voltagem e a passagem da corrente elétrica. Estudos de caso em edifícios reais ainda não foram realizados (CASINI, 2018). A desvantagem dessa tecnologia são os valores altos de fator solar e transmissão luminosa no estado claro, acima de 90%.

Figura 2 - Vidro termocrômico (a) e Vidro eletrocrômico (b)



Fonte: Granqvist (2016, tradução nossa).

Figura 3 - Ilustração da dinâmica das unidades de vidro eletrocrômico (UVI) em cada estado operacional

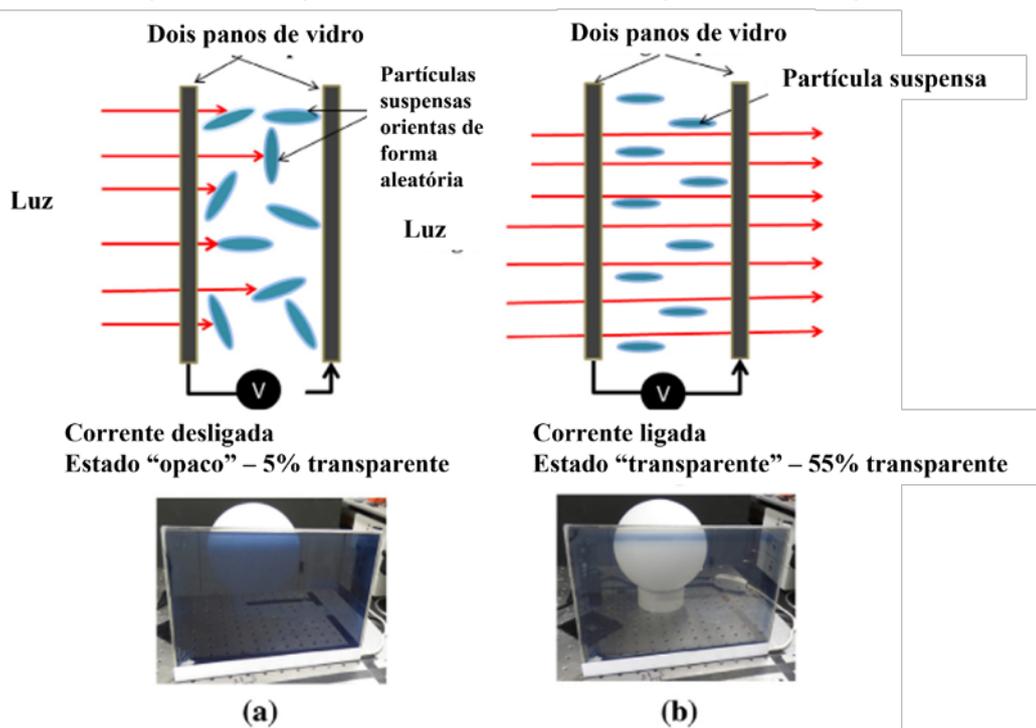


Fonte: DeForest *et al.* (2017, tradução nossa).

A partir de 2006, as janelas inteligentes incluem os vidros comutáveis de partículas suspensas e os vidros de cristal líquido. No contexto internacional, a tecnologia de vidros com partículas suspensas é novidade e está em fase de testes em laboratório em Dublin, Irlanda (53° N). Os vidros comutáveis têm o propósito similar ao vidro eletrocrômico de mudar de estado “opaco” para o “claro”, mas funciona de maneira diferente. As partículas suspensas em um líquido ou gel orgânico são rearranjadas de forma a deixar ou não a luz passar de acordo com a passagem de corrente elétrica, como mostra a Figura 4. Essa tecnologia está em fase experimental e é novidade tanto no contexto europeu como no brasileiro, até o momento sem estudos de caso em edifícios reais (GHOSH; NORTON; DUFFY, 2016). O vidro de cristal líquido é uma derivação da tecnologia de partículas suspensas, tem funcionamento similar aos vidros comutáveis de partículas suspensas e está em estágio de desenvolvimento em laboratório (GHOSH; MALLICK, 2018).

O vidro gasocrômico é composto de cinco camadas. As duas camadas mais externas são vidros flutuantes simples. Dentro delas há mais três, sendo uma camada de trióxido de tungstênio (WO_3) e Paládio (Pd), uma camada com polímero transparente e uma última com mistura de gases. Somente esta última é necessária para a mudança de estado “claro” para “escuro”. A adição de mistura de gás Argônio com Hidrogênio altera essa camada para o estado “escuro” (H_2/Ar) – TL = 15% e FS = 28%. Para reverter essa camada para o estado “claro” – TL = 54% e FS = 65% –, a mistura utilizada é gás Argônio com Oxigênio (O_2/Ar). As desvantagens dessa tecnologia são os altos custos de manutenção e instalação. A camada de gás também precisa estar sempre hermeticamente fechada, o que dificulta a sua manutenção.

Figura 4 - Vidros de partículas suspensas mostrando os estados “opaco” (a) e transparente (b)



Fonte: Ghosh, Norton e Duffy (2016, p. 116, tradução nossa).

A janela electrocinética de pixel é uma tecnologia que introduz a possibilidade de modular a tonalidade e a temperatura da luz visível recebida. Essa tecnologia de partículas polarizadas segue uma abordagem mais próxima da tecnologia de exibição de cristais líquidos, ou seja, controlando o movimento das partículas coloridas por meio de eletroforese para modular separadamente tanto a transmissão quanto o matiz da luz de entrada. O sistema entrega dois eletrodos planares, não muito diferentes daqueles encontrados em monitores LCD ou mesmo no vidro electrocrômico, controlando uma dispersão electroforética de partículas de duas cores primárias, complementares (azul/amarelo, vermelho/ciano ou verde/magenta também são viáveis para aplicações fora da janela) e caracterizadas por cargas elétricas opostas. O sistema é composto de uma malha de células com formato de favo de mel, de 500 mm, composto de eletrodos que são carregados e capazes de expressar milhares de combinações de cores. A propriedade controlada por essa tecnologia é a transmissão luminosa – estado “claro” com TL = 75% e escuro com TL = 22%. Valores de fator solar não foram divulgados e estão em fase de estudo (CASINI, 2018).

A janela ajustável de deformação de elastômero tira proveito de reações mecânicas, em vez de reações electroquímicas, como ocorre nas outras janelas inteligentes descritas. A tecnologia explora a deformação geométrica da superfície envidraçada para controlar a dispersão da luz, transformando a janela de clara para translúcida ou em qualquer estado intermediário. Esse efeito é obtido por meio de um sanduíche de vidro ou painel de polímero entre duas camadas transparentes de elastômero dielétrico, que são pulverizadas com uma rede de nanofios de prata eletricamente condutores. Devido ao tamanho pequeno (alguns milímetros de comprimento e 90 nm de diâmetro), os nanofios são invisíveis aos olhos e não alteram significativamente a transmissão de luz, mas são extremamente reativos a estímulos eletromagnéticos. Quando a tensão é aplicada à janela, os nanofios são energizados e se transformam em eletrodos, que tendem a se mover um em direção ao outro por forças coulombianas que comprimem e deformam os dois elastômeros das camadas inferiores. Pela distribuição desnivelada dos nanofios, a superfície do vidro se torna irregular e refrata as ondas visíveis, reduzindo a sua transparência para 20% e permanecendo com cor perfeitamente neutra. Quando o circuito está desligado, os nanofios ficam em posição regular e o vidro atinge transparência de 80%. Essa tecnologia ainda está sendo desenvolvida em laboratório (CASINI, 2018).

A partir da discussão de mudanças de estados, é possível resumir as propriedades das janelas inteligentes, como mostra o Quadro 2. É importante ressaltar que o vidro electrocrômico, as janelas de compósitos em vidro nanocristal, o vidro de cristal líquido e o vidro de partículas suspensas operam em três estados – “claro” (ou brilhante), “resfriamento” e “escuro” –, enquanto as outras partículas operam nos estados “claro”

e “escuro”. As demais janelas descritas neste item e na Figura 1 que não foram contempladas no Quadro 2 estão em fase experimental, sem aplicação em estudos de caso em edifícios reais e com suas propriedades ainda em estudo (CASINI, 2018).

O vidro eletrocromico se mostra promissor para a aplicação no contexto brasileiro em relação às outras tecnologias de janelas inteligentes pela maior capacidade de controle das propriedades de transmissão luminosa e fator solar. De acordo com DeForest *et al.* (2017), outra característica vantajosa do vidro eletrocromico são os três estados operacionais, que incluem o estado de resfriamento, no qual o fator solar se mantém em torno de 40%, enquanto a transmissão luminosa se mantém em 60%. A janela inteligente de cristal líquido também oferece o estado de resfriamento, mas apresenta valores superiores a 50% em relação ao fator solar e à transmissão luminosa (GHOSH; NORTON; DUFFY, 2016). Outro ponto importante é que a visibilidade dos materiais varia. No estado claro, as janelas inteligentes funcionam como elementos transparentes e, à medida que escurecem, se tornam translúcidas e a cor do material e consequentemente a da luz também mudam, o que dificulta a boa visibilidade. Isso ocorre com o vidro eletrocromico. E, por isso, estudos de percepção dos usuários foram realizados (PAINTER *et al.*, 2016; DAY *et al.*, 2019). A seguir são discutidos estudos de aplicação, percepção e aceitabilidade do vidro eletrocromico.

DeForest *et al.* (2017) tiveram como objetivo analisar o vidro eletrocromico *dual-band electrochromic glazing* em um edifício residencial e dois comerciais em 16 zonas bioclimáticas nos EUA, incluindo climas quentes, temperados e frios. Foram realizadas simulações no *software* EnergyPlus a partir de modelos de referência dos edifícios, desenvolvidos pelo Departamento de Energia dos EUA. A redução no consumo energético para iluminação e ar-condicionado pode chegar a 36% em climas quentes e 10% em climas frios. A principal conclusão dos autores é a de que “[...] o potencial de economia real pode ser maior para certos tipos de configurações, por exemplo, o uso corriqueiro de fachadas envidraçadas, muito comum no desenho de edifícios de escritórios urbanos [...]”. Considerando climas quentes, nas regiões bioclimáticas 1A (Miami – quente e úmido) e 2A (Houston – predominantemente quente e seco), as tecnologias de vidro eletrocromico testadas se mostram bem promissoras (DEFOREST *et al.*, 2017, p. 108).

Quadro 2 - Quadro-resumo das propriedades das janelas inteligentes

Propriedades	Tecnologia de vidro				
	Termocrômico	Gasocrômico	Eletrocromico	Pixel eletroquinético	Cristal líquido
Número de estados	2	2	3	2	3
Estados operacionais	Claro e escuro	Claro e escuro	Claro, resfriamento e escuro	Claro e escuro	Claro, resfriamento e escuro
Visibilidade	Variável	Variável	Variável	Variável	Variável
Transmissão luminosa	80% – 15%	54% – 15%	60% – 1%	75% – 22%	69% – 55%
Fator solar	60% – 20%	65% – 28%	46% – 6%	Não definido	75% – 50%
Potência para mudança de estado	Não requer	Não requer	2,5 W/m ²	Não definido	5 – 10 W/m ²
Mudança de estado	Minutos	< 1 min	5 min a 12 min	10 s	Instantâneo – 40 ms
Cor do material	Variável	Azul	Azul ou verde	Grande variação	Claro, bronze, cinza e verde
Durabilidade	Não definido	Não definido	Mais de 30 anos	Desconhecida	Maior que 10 anos
Transmitância térmica	Varia entre 0,5 W/m ² K e 1,6 W/m ² K, conforme a composição da janela				
Controle	Varição de temperatura (68 °C)	Adição/remoção de H ₂ ou O ₂	Interruptor de parede, controle remoto, sensores (luz e temperatura, <i>timer</i>)		

Fonte: adaptado de Granqvist (2016) e Casini (2018).

Chambers *et al.* (2019) avaliaram o potencial de economia de energia em modelos representativos de edifícios de escritórios em diferentes climas na Suíça. Neles características do vidro eletrocromico foram incorporadas. Os resultados mostraram que o vidro eletrocromico foi particularmente efetivo em edifícios que tinham alta demanda por resfriamento, o qual era responsável por 20 kWh/m² ano, com potencial de redução de 5,5 kWh/m² ano ou 5,2% da demanda típica desses edifícios de escritórios, de 105 kWh/m² ano, incluindo todos os usos finais.

No Brasil, Porto (2019) comparou dois vidros simples (3 mm e 6 mm) e o vidro eletrocromico (SageGlass de 9 mm) com o objetivo de analisar o consumo de energia e o conforto térmico provenientes da climatização artificial e da ventilação natural. As simulações foram realizadas no *software* EnergyPlus em duas zonas bioclimáticas brasileiras: ZB 2 – Camaquã-RS e ZB 8 – Manaus-AM. Foram consideradas nas simulações a densidade de ocupação de uma pessoa a cada 15,5 m² e a carga de equipamentos de 5,4 W/m². O ambiente se encontrava ocupado de segunda a sexta-feira entre 8h e 12h e 14h e 18h com 100% de ocupação e entre 12h e 14h com 10%. A ventilação natural foi configurada através do *AirflowNetwork*, o que possibilitou as aberturas das janelas e das portas, definindo os limites de temperatura para que ocorresse a ventilação natural quando a temperatura interna estivesse superior a 25 °C. A configuração do vidro eletrocromico se deu a partir de sensores de temperatura externa do ar. Os sensores aplicados nessas simulações foram o da temperatura externa e o *setpoint* escolhido foi de 23 °C para ZB 2 e de 26 °C para ZB 8; portanto, o vidro está totalmente colorido quando a temperatura externa estiver maior ou igual a 23 °C e 26 °C para ZB 2 e ZB 8. A análise do conforto térmico foi feita pelo modelo adaptativo ASHRAE Standard 55 (AMERICAN..., 2010). Em função da configuração dos estados “claro” e “escuro” estabelecidos, na zona bioclimática 2, o vidro eletrocromico se encontrava nos meses de inverno no estado brilhante (ou claro), pois a temperatura de *setpoint* para mudança de estado do vidro era sempre maior que a temperatura externa, necessitando, portanto, do aporte da radiação solar. Os resultados mostraram que na ZB 2 o vidro eletrocromico aumentou o desconforto por frio nos meses de inverno por não permitir a entrada de radiação solar no ambiente interno. Pode-se observar que o vidro eletrocromico obteve melhor desempenho quando comparado com os outros na zona bioclimática 8, por se tratar de uma região muito quente, onde o controle de radiação solar é fundamental, sendo assim uma ótima opção. O uso do vidro eletrocromico na zona bioclimática 8 propiciou a diminuição de consumo energético através da redução da transmissão luminosa de 67,6% para 19,3% e do fator solar de 63,1% para 26,3%. Sobre o potencial de uso desse tipo de vidro em climas quentes, conclui-se que ainda é necessário maior aprofundamento para a gama de climas do contexto brasileiro. Ressalta-se que o vidro eletrocromico só foi testado em duas zonas bioclimáticas neste trabalho, sem abranger outros contextos climáticos.

Os estudos descritos até aqui tinham como foco a análise do desempenho do vidro eletrocromico sob a ótica da redução do consumo energético e do conforto térmico. Neles, pouco se discutiu acerca do conforto visual e da opinião do usuário. Em ambientes de escritórios, em especial, há vários estudos sobre a percepção do usuário sobre o vidro eletrocromico. Esse é um aspecto importante na aplicação dessas tecnologias, uma vez que a aceitação do usuário é item relevante para o bom funcionamento dos sistemas inovadores. A interação do usuário com o ambiente de trabalho, sua satisfação e conforto visual são aspectos complexos para ser avaliados, especialmente no caso do vidro eletrocromico. Painter *et al.* (2016) tiveram como objetivo descrever e explicar o processo de interação dos usuários com o vidro eletrocromico em ambiente de escritório. O estudo utilizou duas instalações de vidro eletrocromico em dois ambientes de escritórios na Universidade de Montfort, Leicester, no Reino Unido. O método dos autores combinou realização de entrevistas e questionários, medições *in loco* com fotografias HDR e medições de valores de iluminância. O questionário e as entrevistas permitiram explorar as razões subjacentes a uma preferência pelo uso de persianas ou vidro eletrocromico. Na sala A – em que o controle era manual –, os usuários tinham opinião positiva em relação à aplicação de tecnologia de vidro eletrocromico, enquanto na sala B – em que o controle era automático – os usuários eram mais céticos e prefeririam ter o controle dos sistemas de janela. Conclui-se que a possibilidade de controle por parte do usuário é um fator de satisfação no uso dos vidros eletrocromicos.

Day *et al.* (2019) realizaram medições *in loco* e aplicaram 1.068 questionários em três grandes edifícios comerciais que utilizavam tipos diferentes de dispositivos de sombreamento nos Estados Unidos: persianas automatizadas, vidro eletrocromico e persianas rolô. Dentre as descobertas feitas, destaca-se a relação direta entre a satisfação dos ocupantes com o acesso à luz natural e uma maior produtividade e satisfação com o ambiente de trabalho, comprovando a importância da luz natural nesses ambientes. Houve críticas dos usuários nos ambientes com vidro eletrocromico, porque a sensação de escuridão era constante. Nesses ambientes, o controle de mudança de estado era automatizado por sensores dependendo do horário, da incidência direta de sol e da profundidade da penetração direta do sol no edifício. Quando o vidro se encontrava no estado escuro, o valor de transmissão luminosa abaixava para aproximadamente 1%. Foi

concluído no estudo a importância do projeto, considerando as percepções do usuário com relação ao conforto térmico e visual e não somente a necessidade da eficiência energética. O vidro eletrocromico no estudo foi implementado para fins de economia e eficiência energética, ignorando as necessidades de conforto visual e opinião do usuário.

Em outro estudo, Boubekri *et al.* (2020) tinham como objetivo explorar o impacto da luz natural e da vista externa no desempenho cognitivo e do sono em trabalhadores em dois ambientes de escritório nos Estados Unidos. Neste estudo, os usuários trabalhavam de segunda a sexta, entre 8h e 18h, em cada um dos dois ambientes com disposição interna (leiaute), mobiliário e orientação solar idênticos. Como única diferenciação, um dos ambientes apresentava vidro eletrocromico na janela e o outro persianas tradicionais, produzindo condições de iluminação com estímulos circadianos diferentes. Participantes dormiam em média 37 min a mais e tinham melhor desempenho em testes cognitivos quando expostos à luz natural otimizada e à vista exterior durante o dia, o que era proporcionado pelo ambiente com vidro eletrocromico. Esse aspecto evidencia outra vantagem relevante no caso dessa tecnologia de vidro.

Na escala do ambiente interno, a opinião do usuário e a aceitabilidade do vidro eletrocromico foram discutidas, mas há divergências nesses pontos. No estudo de Day *et al.* (2019), o controle era automatizado por sensores e temporizadores, o que criava um ambiente escuro e com pouca vista externa, de acordo com os usuários. Já para Boubekri *et al.* (2020), a aceitabilidade dessa tecnologia foi positiva, uma vez que os participantes da pesquisa tinham iluminação natural otimizada e vista exterior durante o dia em comparação com o outro ambiente, que era constituído de persianas, o que bloqueava a vista externa. A seguir, são apresentados e discutidos os sistemas de redirecionamento da luz.

Sistemas de redirecionamento da luz: tecnologias e potencialidades para aproveitamento da luz natural

A sistematização dos sistemas de redirecionamento da luz incluiu painéis prismáticos, painéis *laser cut*, vidros com perfis refletores e sistema de vidro com microlamelas. De acordo com Garrocho (2005) e a Agência Internacional de Energia (INTERNATIONAL..., 2016), os painéis prismáticos têm valores reduzidos de transmissão luminosa, podendo resultar em valores de iluminância reduzidos nos ambientes internos. Os sistemas de microlamelas apresentam maiores valores de transmissão luminosa e boa uniformidade, mas oferecem proteção reduzida contra ofuscamento (CIAMPINI, 2005; INTERNATIONAL..., 2016). Elementos móveis, alterados conforme mudanças nas condições de iluminação, como venezianas refletivas e prateleiras de luz, estão em fase de concepção e prototipagem, com poucos estudos de caso em modelos físicos ou ambientes reais (DOGAN; STEC, 2016; ELTAWHEEL *et al.*, 2020). Em vista disso, não foram aprofundados na revisão teórica.

Diante das limitações desses diversos sistemas, os componentes óticos microestruturados foram desenvolvidos e, a partir de 2015, ganharam destaque. As microestruturas permitem o controle do ofuscamento nas regiões próximas das janelas e oferecem maior penetração da luz natural nos ambientes internos (JAKUBOWSKY; NEYER, 2017). Contudo, esse sistema precisa ser mais investigado em climas tropicais, como no Brasil. E, por isso, neste item o foco será na descrição dos sistemas de redirecionamento da luz natural, apresentados na Figura 1, com ênfase e aprofundamento nos sistemas microestruturados.

No contexto internacional, há grande foco do estudo desses sistemas na melhoria da distribuição da luz natural através de simulação computacional, especialmente em ambientes de escritórios. As métricas utilizadas são as dinâmicas baseadas no clima (Climate-Based Daylight Modelling – CBDM), que compreendem espaço de tempo anual, correspondendo à autonomia de luz natural (DA), à iluminância natural útil (UDI) e ao consumo energético anual (TREGENZA; MARDALJEVIC, 2018).

Dogan e Stec (2016) tiveram como objetivo explorar a convergência de prototipagem rápida e desenho paramétrico nos *softwares* Rhinoceros e Grasshopper para desenvolver arranjos de sistema de prateleira de luz horizontal. Esse sistema se adapta com giros no seu eixo conforme as condições de iluminação são modificadas. As simulações foram realizadas em ambiente de escritório voltado para o sul nas cidades de Nova Iorque (latitude 40° Norte), Anchorage (latitude 61° Norte) e Phoenix (latitude 33° Norte). Os resultados mostraram que o sistema proposto de prateleira de luz aumentou os valores de iluminância natural útil – entre 100 e 3.000 lux – para acima de 69% no meio do ambiente e nos espaços mais distantes da janela. Além disso, o sistema proposto mitigou a incidência de ofuscamento próximo à janela, aumentando os valores de UDI de 50% para 60% na cidade de Nova Iorque, o que diminuiu a incidência de ofuscamento, com níveis de iluminância acima de 3.000 lux. Em Anchorage e Phoenix, não houve alteração nos valores de UDI nas regiões próximas à janela, permanecendo em 50% e 70%, respectivamente. Assim, o sistema

proposto não ajudou a mitigar efetivamente a incidência de ofuscamento nas regiões próximas à janela. Vale ressaltar que o sistema ainda está em fase de protótipo, sem estudos de caso em edifícios reais.

Eltaweel *et al.* (2020) fizeram estudos utilizando os *softwares* Grasshopper, DIVA e Rhinoceros em ambiente de escritório em Novo Cairo, Egito (latitude 30° Norte). O objetivo do estudo era investigar o sistema de venezianas refletivas, com seção multicurvatura, que podiam acompanhar a trajetória do sol, mudando a sua posição para proteger o espaço interno dos raios diretos. A janela foi dividida em duas partes: a porção inferior era constituída de vidro eletrocromico até 2,20 m de altura; e na parte superior de sistema de venezianas refletivas com vidro termocromico com altura de 1,40 m. Os autores concluíram que o sistema proposto mostrou resultados promissores, uma vez que mais de 90% da área de trabalho se encontrava em valores de iluminância entre 300 lux e 500 lux durante os horários de trabalho, entre 9h e 17h. Todavia, esse sistema não foi testado em ambientes de escritórios reais.

Mashaly, Nassar e El-Haggar (2018) desenvolveram um modelo matemático e estudos de validação para calcular corretamente a distribuição da luz natural de um sistema de painel prismático. Os autores concluíram que os painéis prismáticos têm grande potencial para aumentar a uniformidade da luz natural nos ambientes internos, ocorrendo a otimização do sistema quando as altitudes solares variam entre 50° e 80°, principalmente quando o sol da tarde incide sobre o sistema em clima árido e desértico.

No contexto brasileiro, Ciampini (2005) avaliou quantitativamente diferentes dispositivos de iluminação natural em Campinas-SP (latitude 22° Sul/longitude 47° Oeste). No estudo, foram construídos quatro protótipos em modelos reduzidos, com sensores internos e externos para medir os valores de iluminância. Foram testados os sistemas Laser Cut Panel (LCP) e Channel Panel – sistemas formados por folhas de plástico acrílico espaçadas a cada 6 mm, além do vidro simples de 3 mm. As medições foram registradas das 8h às 18h, de março a julho. Após os testes, os sistemas Laser Cut Panel e Channel Panel aumentaram significativamente os valores de iluminância do ambiente, mas não evitaram o ofuscamento quando as superfícies refletoras se encontraram na altura do observador. Recomendou-se que esses sistemas se localizem a pelo menos 1,90 m ou com algum tipo de proteção adequada para que os feixes de luz não atinjam diretamente o olho do usuário.

Em edifícios não residenciais em Brasília (15° Sul/47° Oeste), Garrocho (2005) propôs avaliar as configurações de aberturas zenitais nos projetos arquitetônicos e nos edifícios do tipo centros de compras e usar tecnologias e sistemas avançados para obtenção de conforto térmico e luminoso dos ambientes internos. Nas simulações, foi utilizado o *software* Rayfront, v.1.04, para estudo de três aberturas zenitais: teto de dupla inclinação, lanternim e *shed* voltado para o sul. As três aberturas zenitais foram modeladas no *software* 3D Solar e, em seguida, exportadas para o Rayfront. As simulações foram realizadas em 22/3 com céu parcialmente encoberto, 22/6 com céu claro, 23/9 com céu parcialmente encoberto e 22/12 com céu encoberto às 9h, às 12h e às 16h. Utilizaram-se o vidro incolor de 6 mm e dois sistemas de redirecionamento da luz natural: painel prismático e sistema com microlamelas. A análise dos resultados foi feita a partir dos valores obtidos de iluminância no campo horizontal. Conclui-se que o sistema de microlamelas obteve o melhor desempenho luminoso, pois permitiu a melhor distribuição e uniformidade da luz natural no ambiente, pela maior transmissão luminosa de 60% contra os 40% do painel prismático. O painel prismático permitiu boa uniformidade da luz, porém com valores baixos de iluminância.

Chaves (2012) estudou o sistema de painel prismático em aberturas laterais em ambientes de escritórios voltados para o norte, avaliando seu desempenho com relação a três cidades com latitudes e climas distintos – Brasília, Maceió e Florianópolis –, por meio de simulações computacionais estáticas. Foi concluído que o tipo de céu e o horário mais adequado para usar o sistema foram o céu claro às 15h. Em todas as situações simuladas, Maceió (latitude 9°39' Sul) obteve maior quantidade de valores satisfatórios de iluminância com o painel prismático do que com o vidro. Conclui-se que o uso do painel prismático elevou os níveis de iluminância, em comparação com o vidro incolor, de maneira geral nos pontos referentes a até aproximadamente dois terços do ambiente, o que aumentou o alcance da luz natural em áreas mais profundas. No entanto, as simulações realizadas foram para dias e horários específicos, nos dias 22/6, 23/9 e 22/12 às 9h, 12h e 15h, com condição de céu parcialmente encoberto sem a utilização de simulações dinâmicas para avaliar o ano inteiro sob diferentes condições de céu, além dos horários estipulados.

Carvalho (2021) também traz contribuições importantes na análise do potencial luminoso por redirecionamento de elementos de controle de insolação diante do conforto térmico e luminoso na cidade de Florianópolis-SC (latitude 27°35' Sul). Por meio da execução de simulações computacionais no *software* Apolux IV, os resultados demonstraram que os elementos de controle de insolação foram capazes de bloquear uma porcentagem similar da radiação solar incidente no plano da abertura. Porém, apresentaram diferente aproveitamento da energia luminosa incidente em sua superfície para iluminar o plano de trabalho.

O método proposto contribuiu para uma nova abordagem na análise do potencial luminoso por redirecionamento desses elementos.

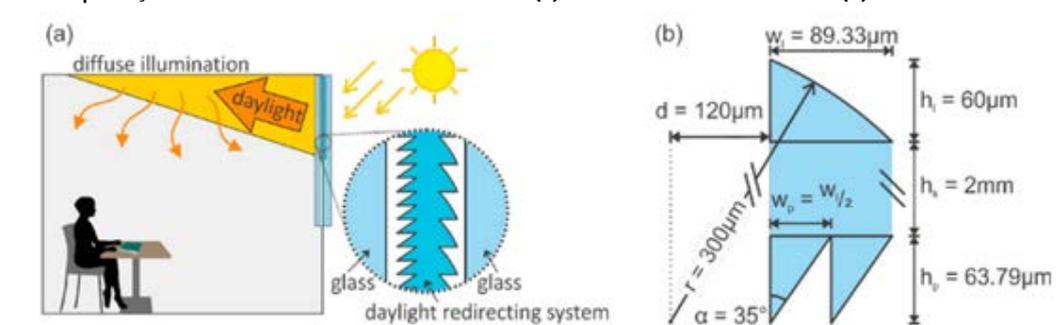
A partir de 2015, o desenvolvimento de sistemas microestruturados trouxe vantagens em relação aos anteriores, por permitirem um alcance mais profundo da luz natural. Além disso, os sistemas microestruturados puderam ser aplicados em janelas já existentes ou adicionados como uma camada fina de 3 mm entre as lâminas de vidro, no caso de mais de uma camada nas janelas (INTERNATIONAL..., 2016). No Instituto Fraunhofer, na Alemanha, componentes microestruturados de redirecionamento da luz foram desenvolvidos como alternativa para melhorar a eficiência energética, o equilíbrio do ciclo de vida do material e o conforto luminoso nos ambientes internos de edificações não residenciais (MUELLER, 2019). A Figura 5 mostra o protótipo desenvolvido no Instituto Fraunhofer, em Stuttgart (JAKUBOWSKY; NEYER, 2017).

Mueller (2019) estudou a aplicação de dois componentes microestruturados de luz solar em diferentes zonas climáticas e latitudes (Cingapura e Kampala, 0°; Hong Kong e Alice Springs, 24° S; Londres e Berlim, 50° N; e Estocolmo e Anchorage, 60° N), com simulações computacionais dinâmicas. Os resultados do ambiente interno sem os sistemas de redirecionamento de luz natural mostraram menos de 20% dos espaços com autonomia de luz natural de 300 lux (ou seja, valores de iluminação natural acima de 300 lux na maior parte dos espaços). Com a aplicação do sistema proposto, a luz é redirecionada para o teto e fornece boa distribuição de luz natural, com valores entre 300 lux e 500 lux, com valores de autonomia de luz natural superiores a 60% (MUELLER, 2019, p. 58-59). Neste estudo, pode-se concluir que, em baixas latitudes – entre 0° e 30° Sul e Norte –, o sistema de microestruturas pode ser aplicado. Embora promissores e com bons resultados em latitudes que incluem o Brasil, estudos de aplicabilidade desse sistema precisam ser realizados.

Mueller (2019) buscou utilizar o sistema de microestruturas mesclado ao sistema de iluminação artificial. O sistema foi posto entre dois painéis de vidro e houve a adição de lâmpadas LED no canto da janela. O método do trabalho consistiu na descrição do sistema e na sua aplicação em ambiente de escritório. Os resultados da pesquisa mostraram que a iluminação do ambiente mantinha qualidade alta, com valores de iluminância entre 350 lux e 600 lux, com baixo consumo energético e com densidade de potência instalada de 11 W/m². Além disso, a intensidade da fonte luminosa e a temperatura de cor podem ser alteradas nesse sistema. A Figura 6 mostra o protótipo desenvolvido e a simulação da aplicação desse sistema integrado com LED (MUELLER, 2017).

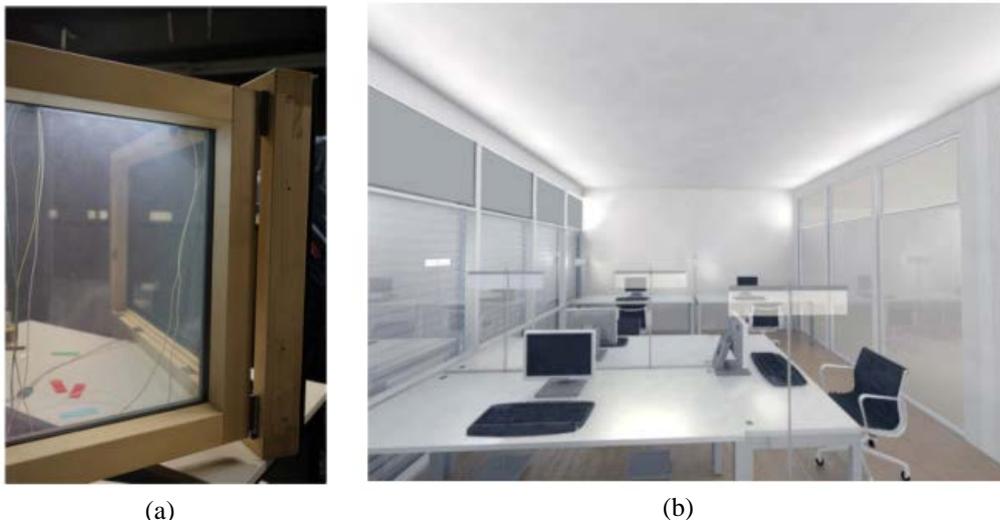
Kostro *et al.* (2019) relataram o processo de fabricação, acertos e dificuldades na fabricação do sistema de microestruturas em larga escala. No total houve quatro iterações, ciclos de repetição e acúmulo de experiências, entre o desenho da microestrutura até a execução do produto, atingindo um resultado satisfatório para protótipo e base para a produção piloto, em larga escala. Cada iteração durou entre 6 meses e 12 meses, sendo o suporte de longo prazo envolvendo academia, indústria e universidade essencial para o desenvolvimento do protótipo da microestrutura. Cerca de 10 m de filme de microestruturas foram produzidos. O revestimento foi otimizado para obter desempenho óptico satisfatório do material e houve vários desafios para um revestimento limpo, sem manchas ou defeitos na impressão do filme das microestruturas. No final, essas dificuldades e defeitos foram solucionados quando o filme era produzido no tamanho intermediário (10 cm x 10 cm). Atualmente, as microestruturas estão sendo desenvolvidas para ser produzidas em larga escala, a fim de ser aplicadas em janelas de dimensões modulares de 0,6 m x 1 m. A principal conclusão do estudo foi a de que a integração entre universidade, academia e indústria foi essencial para o suporte e o desenvolvimento dessa tecnologia inovadora em escala comercial.

Figura 5 - Aplicação do sistema de microestruturas (a) e características físicas (b)



Fonte: Jakubowsky e Neyer (2017).

Figura 6 - Protótipo do sistema de microestruturas integrado com o sistema LED (a) e ambiente de escritório com guias de LED nas áreas superiores das janelas e das partições (b)



Fonte: Mueller (2017).

Com base na descrição e na discussão desses sistemas, o Quadro 3 apresenta o resumo com os sistemas discutidos neste item. As venezianas com seção multicurvatura e as prateleiras de luz não foram abordadas no quadro por estarem em fase de protótipo, sem estudos de caso em ambientes reais (DOGAN; STEC, 2016; ELTAWHEEL *et al.*, 2020).

Como visto neste item, os painéis prismáticos, os painéis *laser cut* e os sistemas de microlamelas apresentam limitações quanto ao seu uso. Os painéis prismáticos possuem valores reduzidos de transmissão luminosa, o que proporciona iluminação natural reduzida nos ambientes internos (GARROCHO, 2005). Os painéis *laser cut* e os sistemas de microlamelas apresentam maiores valores de transmissão luminosa e boa uniformidade, mas têm problemas relacionados a ofuscamento nas regiões próximas às janelas (CIAMPINI, 2005; INTERNATIONAL..., 2016).

Já os componentes óticos microestruturados se destacam porque a maior parte da luz natural é redirecionada para o teto – entre 45% e 85% da transmissão luminosa e menos de um terço da luz é redirecionada para baixo –, o que faz ampliar o alcance da luz natural para o fundo do ambiente e reduzir problemas de ofuscamento próximos à janela (JAKUBOWSKY; NEYER, 2017). Além disso, esse sistema pode ser integrado com lâmpadas LED com diferentes configurações de cor e intensidade de iluminação, apresentando valores reduzidos de consumo energético e proporcionando boa iluminação.

Conclusão

Como descrito, soluções que empregaram o uso de fachadas avançadas utilizaram tecnologias inovadoras. As janelas inteligentes e os sistemas de redirecionamento da luz natural podem ser incluídos no conceito de “fachadas avançadas”, sendo proposta uma classificação geral. A partir da discussão apresentada, algumas conclusões são possíveis.

No estudo de janelas inteligentes, quatro focos de investigação puderam ser observados com relação ao vidro eletrocromico:

- (a) exame de suas propriedades térmicas e lumínicas;
- (b) estudos sobre eficiência energética;
- (c) desempenho térmico e lumínico em diferentes zonas bioclimáticas no Brasil e no contexto mundial; e
- (d) aplicabilidade em ambientes não residenciais, considerando o ponto de vista do usuário.

Sob o ponto de vista do usuário, a aceitabilidade do vidro eletrocromico foi maior, sobretudo quando proporcionava iluminação adequada, sem problemas de ofuscamento nos ambientes e com acesso à vista exterior. No caso do tipo de controles, os manuais mostraram-se mais adequados com maior aceitação dos usuários.

Quadro 3 - Quadro-resumo das propriedades dos sistemas de redirecionamento da luz natural

Propriedades	Painéis prismáticos	Painéis <i>laser cut</i>	Sistemas de microlamelas	Componentes óticos microestruturados
Transmissão luminosa	40%	92%	60%	1% – 35% para baixo/45% – 85% para cima
Fator solar	> 20%	56%	> 10%	Em estudo
Transmitância térmica	1,6 W/m ² K	1,5 W/m ² K	1,2 W/m ² K	Em estudo
Cor do material	Incolor	Incolor	Incolor	Incolor
Visibilidade	Translúcido			

Fonte: adaptado de Garrocho (2005), Ciampini (2005), Chaves (2012), IEA (INTERNATIONAL..., 2016), Lee *et al.* (2017) e Jakubowsky e Neyer (2017).

As janelas inteligentes mostram-se promissoras em climas quentes, como o brasileiro, porque filtram a radiação solar infravermelha indesejada e podem manter a parcela de radiação visível (luz natural). Nessa categoria, a tecnologia de vidro eletrocromico se destaca, porque apresenta maior capacidade de controle das propriedades de transmissão luminosa e fator solar em relação aos demais materiais comparados. No entanto, a opinião do usuário e a aceitabilidade dessa tecnologia precisam ser testadas.

A principal vantagem da aplicação de sistemas de redirecionamento da luz natural é o seu maior alcance no fundo do ambiente, o que é útil ao analisar a lógica econômica de edifícios não residenciais, que é manter a maior área interna disponível para a menor área de fachada possível. Isso é extremamente útil para melhorar o acesso da luz natural em ambientes profundos.

A partir de 2015, os sistemas de redirecionamento da luz natural evoluíram para os sistemas microestruturados, permitindo área ampliada de iluminação natural devido ao maior alcance da luz natural no fundo do ambiente, quando comparados com os demais sistemas. Além disso, podem ser adicionados como uma fina camada em cima de vidros existentes, o que reduz custos de manutenção e instalação.

Em 2016, com o advento das métricas dinâmicas e o desenvolvimento de sistemas de processamentos, houve uma tendência na avaliação desses sistemas de redirecionamento da luz natural, por meio de simulação computacional e métricas dinâmicas, de maneira a otimizar a forma desses sistemas e a distribuição da luz natural resultante. Esse aspecto pode ser percebido nos trabalhos de Dogan e Stec (2016), Eltaweel *et al.* (2020) e Mashaly, Nassar e El-Haggar (2018).

Mueller (2019), ao utilizar métricas como a iluminância natural útil e a autonomia de luz natural,⁹ permitiu a avaliação dos sistemas sob diferentes latitudes e climas no intervalo anual.

Em climas quentes, o vidro eletrocromico se mostrou promissor porque filtra a radiação solar direta, preservando a vista exterior. O sistema de microestruturas também aumentou o alcance da luz natural entre baixas latitudes nos ambientes internos, em latitudes entre 0° e 30° Sul e Norte.

Assim, conclui-se que, embora promissores para climas quentes, esses dois sistemas (vidro eletrocromico e sistema de microestruturas) precisam ser mais investigados em climas brasileiros.

No contexto brasileiro, o trabalho de Porto (2019) traz a problemática do vidro eletrocromico e sua adequação em termos de conforto térmico em duas zonas bioclimáticas brasileiras. Já os trabalhos de Ciampini (2005), Garrocho (2005), Chaves (2012) e Carvalho (2021) tiveram como foco a avaliação do desempenho luminoso, com análise dos níveis de iluminação no ambiente interno (iluminância, uniformidade, componente de luz refletida, etc.), porém com pouca discussão sobre a perspectiva dos usuários. Conclui-se, portanto, que há poucos estudos e ainda incompletos sobre o vidro eletrocromico no Brasil. Dessa forma, destaca-se o aprofundamento desta discussão como essencial a fim de apontar diretrizes mais conclusivas sobre o potencial de uso desses materiais no contexto brasileiro e sua possível aplicabilidade.

⁹Além dos trabalhos mencionados, a Agência Internacional de Energia (INTERNATIONAL..., 2021b) divulgou o relatório *White Paper*, voltado a procedimentos de cálculo para sistemas complexos de janelas, que incluem os sistemas de redirecionamento da luz. Nesse trabalho, há grande ênfase nas métricas dinâmicas para cálculo da luz natural.

Referências

- ALVES, T. *et al.* A methodology for estimating office building energy use baselines by means of land use legislation and reference buildings. **Energy and Buildings**, v. 143, p. 100-113, 2017.
- AMORIM, C. N. D. *et al.* Retrofit e preservação de edifícios não residenciais modernos em Brasília: uma abordagem para eficiência energética e iluminação natural. In: SOUSA, B. A. A. de *et al.* (org.). A construção civil em uma perspectivas econômica, ambiental e social. Guarujá: Editora Científica Digital, 2021.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2010.
- ATTIA, S. *et al.* Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive facade systems. **Energy and Buildings**, v. 179, p. 165-182, 2018.
- BAHAJ, A. B. S.; JAMES, P. A. B.; JENTSCH, M. F. Potential of emerging glazing technologies for highly glazed buildings in hot arid climates. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 5, p. 720-731, 2008.
- BOUBEKRI, M. *et al.* The impact of optimized daylight and views on the sleep duration and cognitive performance of office workers. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 9, p. 1-16, 2020.
- BROTO, C. **New facades**. Barcelona: Links International, 2011.
- CARVALHO, J. M. **Análise do potencial luminoso por redirecionamento de elementos de controle de insolação e a relação com a forma**. Florianópolis, 2021. Dissertação. 167 f. (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.
- CASINI, M. Active dynamic windows: a review. **Renewable Energy**, v. 119, p. 923-934, 2018.
- CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. da. **Metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.
- CHAMBERS, J. *et al.* Evaluating the electricity saving potential of electrochromic glazing for cooling and lighting at the scale of the Swiss non-residential national building stock using a Monte Carlo model. **Energy**, v. 185, p. 136-147, 2019.
- CHAVES, P. W. **Iluminação natural em escritórios**. Brasília, 2012. 163 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- CIAMPINI, F. **Sistemas inovadores de iluminação natural**: estudos de seu desempenho sob condições de céu real em Campinas-SP. Campinas, 2005. 278 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo, Unicamp, Campinas, 2005.
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **CIE S 017/E**: international lighting vocabulary. Vienna, 2020.
- COSTA, J. F. W.; AMORIM, C. N. D. A.; SILVA, J. C. R. e. Retrofit guidelines towards the achievement of net zero energy buildings for office buildings in Brasilia. **Journal of Building Engineering**, v. 32, n. 101680, 2020.
- DAY, J. K. *et al.* Blinded by the light: occupant perceptions and visual comfort assessments of three dynamic daylight control systems and shading strategies. **Building and Environment**, v. 154, p. 107-121, 2019.
- DEFOREST, N. *et al.* A comparative energy analysis of three electrochromic glazing technologies in commercial and residential buildings. **Applied Energy**, v. 192, p. 95-109, 2017.
- DOGAN, T.; STEC, P. Prototyping a facade-mounted, dynamic, dual-axis daylight redirection system. **Lighting Research and Technology**, [S. l.], v. 50, n. 14, p. 583-595, 2016.
- DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. **Design science research**: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- DUSSAULT, J.-M.; GOSSELIN, L. Office buildings with electrochromic windows: a sensitivity analysis of design parameters on energy performance, and thermal and visual comfort. **Energy and Buildings**, v. 153, p. 50-62, 2017.
- ELTAWHEEL, A. *et al.* Advanced parametric louver systems with bi-axis and two-layer designs for an extensive daylighting coverage in a deep-plan office room. **Solar Energy**, v. 206, p. 596-613, 2020.

- FRABBRINI, R. N. Poética dos materiais na arquitetura contemporânea. **Rapisódia**, v. 14, p. 5-32, 2020.
- GARROCHO, J. S. **Luz natural e projeto de arquitetura: estratégias para iluminação zenital em centros de compras**. Brasília, 2005. 117 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.
- GHOSH, A.; MALLICK, T. K. Evaluation of optical properties and protection factors of a PDLC switchable glazing for low energy building integration. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 176, p. 391-396, 2018.
- GHOSH, A.; NORTON, B.; DUFFY, A. Daylighting performance and glare calculation of a suspended particle device switchable glazing. **Solar Energy**, v. 132, p. 114-128, 2016.
- GONÇALVES, J. C. S. *et al.* Desempenho ambiental dos escritórios em caixa de vidro: uma visão geral (parte 01/08). **Vitruvius**, v. 158.08, 2020.
- GONÇALVES, J. C. S. *et al.* O pobre desempenho ambiental dos escritórios em caixa de vidro: conforto térmico e energético. **Vitruvius**, v. 160.02, 2021.
- GONÇALVES, J. C. S. O novo ambiente de trabalho: diversidade ambiental e flexibilidade do espaço. **Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAUUSP**, v. 26, n. 49, p. 1-22, 2019.
- GRANQVIST, C. G. Electrochromics and thermochromics: towards a new paradigm for energy efficient buildings. **Materials Today: Proceedings**, v. 3, p. S2-S11, 2016.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **2020 Highlights: Task 61 – Integrated solutions for Daylight and Electric Lighting**. Stuttgart, 2020. Disponível em: https://task61.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/FINAL_Task61_Highlights2020.pdf. Acesso em: 27 jun. 2021.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **BSDF generation procedures for daylighting systems**. Bartenbach, 2021b. Disponível em: <https://task61.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task61--Technical-Report-C2.1-Whitepaper-BSDF.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2021.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Daylight in buildings**. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000. Disponível em: <https://facades.lbl.gov/sites/all/files/daylight-in-buildings.pdf>. Acesso: 12. dez. 2019.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Daylighting and electric lighting retrofit solutions: a source book of IEA SHC Task 50**. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2016. 97 p. Disponível em: http://task50.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Technical_Report_T50_B6_final.pdf. Acesso em: 12 nov. 2019.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Literature review: energy saving potential of user-centered integrated daylighting solutions**. Lund, 2021a. Disponível em: <https://task61.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task61--Technical-Report-D1-Literature-Review.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2022.
- JAKUBOWSKY, M.; NEYER, A. Optimized design of daylight redirection microstructures combined with planar micro structured light sources for high efficient room lighting integrated in building facades. **Energy Procedia**, v. 122, p. 157-162, 2017.
- JELLE, B. P. *et al.* Fenestration of today and tomorrow: a state-of-the-art review and future research opportunities. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 96, n. 1, p. 1-28, 2012.
- KOSTRO, A. *et al.* From university to industry: challenges in upscaling optical microstructures for daylight redirection in buildings. **Journal of physics: Conference Series**, v. 1343, n. 1, p. 1-6, 2019.
- KUGLEY, S. *et al.* Searching for studies: a guide to information retrieval for Campbell Systematic Reviews. Nashville: Campbell Methods Guides, 2016. Disponível em: https://campbellcollaboration.org/images/Campbell_Methods_Guides_Information_Retrieval.pdf. Acesso em: 21 fev. 2022.
- KUGLEY, S. *et al.* **Searching for studies: a guide to information retrieval for Campbell systematic reviews**. Oslo: The Campbell Collaboration, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.4073/cm.2016.1>. Acesso em: 21 fev. 2022.
- LEE, H. *et al.* Effectiveness of a perforated light shelf for energy saving. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 144-151, 2017.

LIMA, K. M. de; CARAM, R. M. Avaliação de sistemas de janela para suporte a decisões de projeto quanto ao equilíbrio de ganhos de luz e calor. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 117-133, jul./set. 2015.

MASHALY, I. A.; NASSAR, K.; EL-HAGGAR, S. Mathematical model for designing a light redirecting prismatic panel. **Solar Energy**, v. 159, p. 638-649, 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional**: relatório síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**. Rio de Janeiro: Procel, 2008.

MORODER, D. G. *et al.* BSDF generation procedures for daylighting systems: white paper. Bartenbach, 2021a. Disponível em: <https://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task61--Technical-Report-C2.1-Whitepaper-BSDF.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2021.

MORODER, D. G. *et al.* **Workflows and software for the design of integrated lighting solutions**: a technical report of IEA SHC task 61/EBC Annex 77 T61. C. 1. Bartenbach, 2021b. Disponível em: <https://task61.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task61-Workflows-and-software-for-the-design-of-integrated-lighting-solutions.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2021.

MUELLER, H. F. O. Application of micro-structured sunlighting systems in different climatic zones. **Journal of Daylighting**, v. 6, n. 2, p. 52-59, 2019.

MUELLER, H. F. O. Micro-optical structures for daylighting and led systems. **Renewable Energy and Environmental Sustainability**, v. 2, n. 29, p. 1-7, 2017.

PAINTER, B. *et al.* Evaluation of a mixed method approach for studying user interaction with novel building control technology. **Energies**, v. 9, n. 3, p. 1-23, 2016.

PLATAFORMA SUCUPIRA. [Periódicos]. Disponível em: <https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/veiculoPublicacaoQualis/listaConsultaGeralPeriodicos.jsf>. Acesso em: 31 maio 2021.

PORTO, J. da S. **Desempenho termoenergético e ótico da janela inteligente por simulação computacional**. Pelotas, 2019. 95 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

SALAMATI, M. *et al.* Preparation of TiO₂@W-VO₂ thermochromic thin film for the application of energy efficient smart windows and energy modeling studies of the produced glass. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 477-482, 2019.

TÄLLBERG, R. *et al.* Comparison of the energy saving potential of adaptive and controllable smart windows: a state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 200, n. 109828, p. 1-30, 2019.

TOUMA, A. A.; OUAHRANI, D. Shading and day-lighting controls energy savings in offices with fully-glazed facades in hot climates. **Energy and Buildings**, v. 151, p. 263-274, 2017.

TREGENZA, P.; MARDALJEVIC, J. Daylighting buildings: standards and the needs of the designer. **Lighting Research and Technology**, v. 50, n. 1, p. 63-79, 2018.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio financeiro da pesquisa.

João Francisco Walter Costa

Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de Brasília | Campus Darcy Ribeiro, ICC Norte, Bloco A, Sala Ass-000/00 - Subsolo | Brasília - DF - Brasil | CEP 70910-900 | Tel.: (61) 3107-7441 | E-mail: jwaltercosta@gmail.com

Cláudia Naves David Amorim

Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de Brasília | E-mail: clamorim.unb@gmail.com

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

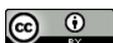
CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.