MATERIAIS TRANSPARENTES E TRANSLUCIDOS INOVADORES EM FACHADAS: CONFORTO VISUAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS NÃO-RESIDENCIAIS NO BRASIL

João Francisco Walter Costa (1); Cláudia Naves David Amorim (2)
(1) Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Arquiteto e Urbanista, jwaltercosta@gmail.com
(2) Doutora, Professora da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, clamorim.unb@gmail.com
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte – Brasília - 70842970, DF - Brasil, +55 61 3107-7441

RESUMO

Após cinquenta anos da popularização de fachadas envidraçadas em edifícios não-residenciais, o vidro ainda é amplamente empregado na arquitetura contemporânea. Devido aos problemas decorrentes do uso intenso de fachadas envidraçadas, tecnologias de materiais transparentes e translúcidos inovadores foram desenvolvidas desde a década de 1980, como tentativa de resolver os problemas térmicos e luminosos causados pelas superfícies envidraçadas, possibilitando o controle de radiação solar indesejada, sendo uma perspectiva futura para aumento da eficiência energética das edificações. No entanto, ainda há questões relacionadas ao desempenho desses materiais em edifícios não-residenciais no Brasil, considerando aspectos térmicos e lumínicos. Assim, o artigo tem como objetivo apresentar um panorama geral sobre materiais transparentes e translúcidos inovadores empregados em fachadas de edifícios não-residenciais. A principal contribuição do artigo é descrever quais dos materiais apresentados e discutidos podem ser promissores para a utilização em edifícios não-residenciais no contexto brasileiro. 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 eletrocrômico 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 micro estruturados são promissores por permitir maior alcance da luz natural na profundidade dos ambientes em relação a outros sistemas. Conclui-se que ainda há poucos estudos de aplicação destes materiais no Brasil e o aprofundamento desta discussão é necessário.

Palavras-chave: materiais transparentes e translúcidos inovadores, janelas inteligentes, sistemas de redirecionamento da luz, eficiência energética

ABSTRACT

After fifty years after the popularization of the glazed façades in non-residential buildings, glass is widely used in contemporary architecture. Since the 1980s, technologies of innovative translucent materials have been developed as a solution to solve issues related to thermal and luminous comfort, because the utilization of these technologies allow the control of unwanted solar radiation and are the future towards the increase of energy efficiency in buildings. Although, there are still questions regarding the application of these materials in office buildings in Brazil related to their thermal and luminous performance. Therefore, this article aims to present an overview of the innovative transparent and translucent materials employed on façades of non-residential buildings. The main contribution of this article is to show which materials are promising to be utilized in non-residential building within the Brazilian context. Through the literature review an overview of the main innovative transparent materials is discussed, which can be divided into categories: smart windows and light redirection systems. It was identified that the electrochromic glazing sets other smart window technologies apart due to the widest range of the G-Value and Light Transmission controls. The microstructured light redirecting systems are a promising technology because they allow a deeper reach of natural light into the depth of the indoor environment. It was concluded that there are few studies testing the applicability of these innovative materials in Brazil and the discussion regarding it must be deepened.

Keywords: innovative transparent materials, smart windows, light redirection systems, energy efficiency

1. INTRODUÇÃO

A arquitetura não-residencial moderna é caracterizada por um conjunto de características, que inclui a transparência, principalmente preservando a visão externa e interna, a necessidade de experimentação dos materiais, a planta livre e a estética experimentada pelos novos materiais – o concreto, o vidro, o aço etc. O uso de fachadas envidraçadas tem papel fundamental na lógica econômica e industrial pela rapidez no emprego e na racionalidade da construção (GIEDION, 1968).

Fabbrini (2020) faz uma ligação importante entre a Arquitetura Moderna e Contemporânea em relação ao uso do vidro. Embora haja diferenças nos tipos e tecnologias aplicadas de vidro, o uso de fachadas envidraçadas frequentemente esteve presente na arquitetura não-residencial. 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, leitosos e refletivos, tornando-se símbolo da arquitetura corporativa. Essa tendência se repete na arquitetura contemporânea (BROTO, 2011). De acordo com Bahaj, James e Jentsch (2008), o uso de fachadas envidraçadas em edifícios não-residenciais em climas áridos e quentes causa problemas como o ofuscamento e o aquecimento excessivo dos ambientes de escritórios, causando o aumento do consumo de ar-condicionado devido à incidência de radiação solar direta absorvida pelas janelas.

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, vidros duplos, triplos e quádruplos. No entanto, o uso destas tecnologias de vidro é recomendado com cautela em climas de baixas latitudes, como em São Paulo. O alto isolamento térmico dos vidros duplos e com múltiplas camadas não é adequado para a envoltória de edifícios em climas quentes, pois nestes climas a radiação solar é a variável de maior impacto nos ambientes internos, ao invés da temperatura do ar externo, como em climas frios.

O uso excessivo de vidro nas fachadas é identificado em vários estudos. 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 PAF – Percentual de Área de Abertura Envidraçada na Fachada de 50% nas quatro fachadas. Este fator, segundo os autores, contribuiu para o aumento do consumo energético para ar-condicionado e iluminação devido a problemas relacionados a superaquecimento dos ambientes internos e ocorrências de ofuscamento.

Estudos evidenciam também aumento desta tipologia de edifícios envidraçados em Brasília. Em um levantamento de 267 edifícios de escritórios em Brasília, foi verificado que em quase dois terços dos edifícios analisados, não havia a presença de proteções solares e quase metade dos edifícios analisados tinham 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.

Gonçalves (2019, p. 9) destaca que o uso de fachadas envidraçadas e plantas 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, sendo o 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..., 2016). 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 melhoria do conforto dos usuários e da eficiência energética.

Por isso, desde a década de 1980, novas tecnologias de vidros foram propostas para resolver os problemas causados pelas superfícies envidraçadas. A partir da experimentação de novas tecnologias de vidros e superfícies translúcidas, as chamadas janelas inteligentes ganharam forte destaque (GRANQVIST, 2016). Materiais inovadores transparentes e translúcidos[1] possibilitam o controle de radiação solar indesejada

[1] NA: Segundo a definição do dicionário Michaelis, o adjetivo "translúcido" é a característica relativa "ao corpo que permite a passagem de luz sem que se possa ver qualquer objeto que esteja por trás dele; transluzente" e "transparente" é o "que permite a passagem da luz, de modo que aquilo que está por detrás fica inteiramente visível".

e são soluções futuras para 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, 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 aplicando-se estes materiais.

O tópico principal da pesquisa compreende os materiais transparentes e translúcidos inovadores em edifícios não-residenciais, os quais se inserem no conceito de "fachada avançada", ainda sem um consenso. Segundo Attia *et al*. (2018, p. 1) "fachadas adaptativas [ou avançadas] são envoltórias de edifícios que são 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". Frente a isso, é fundamental a utilização de materiais inovadores na fachada dos edifícios para se pensar em envoltórias mais eficientes. Ressalta-se que o termo "fachadas avançadas" – *advanced facades* engloba os materiais opacos – utilizados para vedação, proteção solar etc. e os transparentes e translúcidos, que são o âmago deste trabalho.

A iluminação é responsável por 15% (cerca de 2.900tWh) do consumo de energia elétrica mundial (IEA, 2020) e o ar-condicionado por 20% em 2018.[2] Edifícios não-residenciais, neste contexto, têm grande peso no consumo de energia elétrica. Cerca de 21% de energia elétrica (636,4 tWh) é consumida por edificações não-residenciais no Brasil. Além disso, de acordo com o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, de 22% a 30% do consumo de energia elétrica total das edificações destina-se a uso final de iluminação e de 40% a 46% para o uso final de 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, estes edifícios apresentam grande potencial de economia energética de até 50%, quando estratégias bioclimáticas – considerando a envoltória e os ambientes internos mais eficientes são levadas em conta (ALVES et al., 2017; GONÇALVES, 2020; COSTA; AMORIM; SILVA, 2020). Por isso, a discussão sobre fachadas avançadas vem ganhando espaço nos estudos mais atuais. Para economizar energia para o uso final de iluminação e a melhoria do conforto visual em edifícios de escritórios, o presente trabalho tem como foco realizar uma descrição sobre estudos abordando materiais transparentes e translúcidos inovadores para fachadas, como parte de uma tese de doutorado em andamento.

2. OBJETIVO

O objetivo do trabalho é apresentar um panorama geral sobre materiais transparentes e translúcidos inovadores empregados em fachadas de edifícios não residenciais, descrevendo quais materiais podem ser promissores para os climas brasileiros.

3. MÉTODO

A pesquisa bibliográfica constituiu a primeira fase da pesquisa. De acordo com Cervo, Bervian e Da 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 com isso responder às seguintes questões: quais materiais foram abordados pelos autores e em que contexto foram aplicados? E por último, qual foi a contribuição de cada estudo selecionado? Os itens a seguir abordaram os detalhes da revisão sistemática realizada, que compreendeu a busca e a seleção dos artigos e a condução da revisão.

3.1. Revisão sistemática – bases de dados e palavras-chave

A pesquisa está alinhada com duas tarefas da Agência Internacional de Energia (IEA) – *Tasks* 50 e 61[3]. Pelo próprio alinhamento com as *Tasks - IEA*, foram lidos dois relatórios da Agência Internacional de Energia (IEA, 2000; IEA, 2016), que forneceram um panorama sobre os materiais transparentes e translúcidos inovadores[4]. Buscou-se em seguida trabalhos acadêmicos utilizando as palavras-chave – no recorte temporal entre 2000 e 2021. As bases de dados usados foram o Google Scholar, Scopus e SAGE.

---

[2] NA: Saiba mais em https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling. Acesso em: 24 jun. 2021.

[3] NA: IEA Task 50 – Soluções avançadas de iluminação para retrofit de edifícios. Link: https://task50.iea-shc.org/. IEA Task 61 – Soluções integradas de luz natural e elétrica. Link: https://task61.iea-shc.org/. Acesso em: 25 jun. 2021.

[4] NA: Esses relatórios fazem parte da literatura fugitiva – *grey literature*, definida como "o que é produzido em todos os

A busca da revisão bibliográfica constituiu-se de seis levas. As levas 1 a 4 foram focadas em artigos em periódicos internacionais e a 5ª e a 6ª na procura de trabalhos acadêmicos no Brasil. A leva 1 se deu a partir da inserção das palavras-chave - *innovative materials*; *façades*; *non-residential buildings and lighting*. Na leva 2, foram usadas as palavras-chave: *advanced façade, advanced Building skin, adaptive facade systems.* Com base nos resultados, houve a procura de materiais específicos – citados nos artigos encontrados das levas 1 e 2 e nos dois relatórios lidos da IEA (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* e *advanced building skin; light redirecting systems; prismatic panel; complex fenestration system.*

Nas levas 5 e 6 buscou-se a produção científica no Brasil em artigos, teses e dissertações em programas de Pós-Graduação reconhecidos pela CAPES – Plataforma SUCUPIRA nas levas 5 e 6. Buscamos 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: *Brasil*, *Edifícios de escritórios, iluminação natural; Janelas inteligentes; Brasil* e *sistemas de redirecionamento da luz natural.* A Tabela 2 resume as levas de busca e a quantidade de documentos selecionados.

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

Busca	**Palavras-chave**	**Resultados**	**Documentos selecionados**
1ª	*innovative materials*; *façades*; *non-residential buildings and lighting*	5.560	60
2ª	*advanced façade, advanced Building skin, adaptive facade systems*	2.760	44
3ª	*advanced building skin; light redirecting systems*	118	23
4ª	*advanced building skin; smart windows*	18.100	77
5ª	*Brasil, Edifícios de escritórios, iluminação natural, vidros eletrocrômicos*	51	3
6ª	*Brasil, edifícios de escritórios, sistemas de redirecionamento da luz natural*	2.150	5
	Total	28.752	212

No total foram encontrados 28.752 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 – 2016.[5] Além disso, o outro critério de classificação foi o fator de impacto superior a 2 e 0,299 de acordo com a avaliação da *Clarivate Analystics e Scientific Journal Rankings,* respectivamente quando não havia classificação na Plataforma Sucupira.[6] Simultaneamente a esse filtro, foi selecionada a opção "ordenar os resultados por relevância", mostrando os documentos mais citados e procurados nas primeiras páginas de exibições. Em seguida, outro critério de eliminação foi a leitura de títulos. O resumo era lido quando o título era relacionado ao tema. Esses filtros e critérios reduziram significativamente o número de documentos selecionados, chegando a um total de 212.

3.2. Seleção posterior para leitura e condução da revisão teórica

Posteriormente, os 212 trabalhos selecionados foram lidos integralmente, quando o título e os resumos atendiam aos critérios de Dresch, Lacerda e Júnior (2015, p. 189), conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - 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 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 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 Júnior, 2015, p. 192 - 193.

níveis de governo, academia, negócios e indústria, impresso ou em meio eletrônico, mas não é controlado por editores comerciais" (Hamerston, Wade, Jorgensen, 2010, apud Dresch, Lacerda e Júnior, 2015, p. 185).

[5] NA: Mais informações em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/veiculoPublicacaoQualis/listaConsultaGeralPeriodicos.jsf. Acesso em: 31 maio 2021.

[6] NA: Saiba mais em https://www.scimagojr.com/journalrank.php e https://clarivate.com/webofsciencegroup/essays/impact-factor/. Acesso em: 31 maio 2021.

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

Assim, dos 212 documentos selecionados, 31 foram lidos integralmente, incluindo 18 artigos em periódicos, 3 teses, 2 dissertações e 8 outras publicações que incluíram livros e relatórios. A revisão sistemática foi conduzida identificando-se a referência, os parâmetros e focos do estudo. Em seguida, identificamos a principal contribuição de cada estudo e evidenciamos tópicos não discutidos/ abordados.

4. RESULTADOS

Primeiramente, para fins de sistematização do conhecimento com base na revisão teórica, é apresentada uma proposta de classificação dos materiais transparentes e translúcidos inovadores, em um contexto de Fachadas Avançadas. De acordo com Attia *et al*. (2018) o conceito de "fachada avançada" é caracterizado pela utilização de materiais inovadores na fachada dos edifícios – opacos, transparentes e translúcidos. Houve grande avanço nos materiais e sistemas de fachadas e os autores utilizaram este termo para designar fachadas que incluem a utilização de tecnologias e materiais inovadores, por meio dos quais busca-se melhorar o desempenho energético e o conforto dos usuários das edificações. Ressalta-se que o termo "fachadas avançadas" – *advanced facades* engloba os materiais opacos – utilizados para vedação, proteção solar etc. e os transparentes e translúcidos, que são o âmago deste trabalho, com foco em edifícios não-residenciais.

São propostos dois grandes grupos dentro do conceito de Fachadas Avançadas: 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 – que é a característica de controlar as propriedades de transmissão luminosa e fator solar. Foram incluídos os vidros (termo, foto-, e eletro-) crômicos, os de cristal líquido e de partículas suspensas na categoria de janelas inteligentes, mas não foram considerados no estudo os sistemas de redirecionamento da luz natural.

De acordo com a IEA (2000), de forma geral, as janelas convencionais iluminam o ambiente normalmente a uma profundidade de 1,5 a 2 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 vezes a altura da janela ou mais em relação ao piso. A Figura 1 apresenta uma proposta de classificação com base em propriedades e tecnologias comuns conforme as definições encontradas.

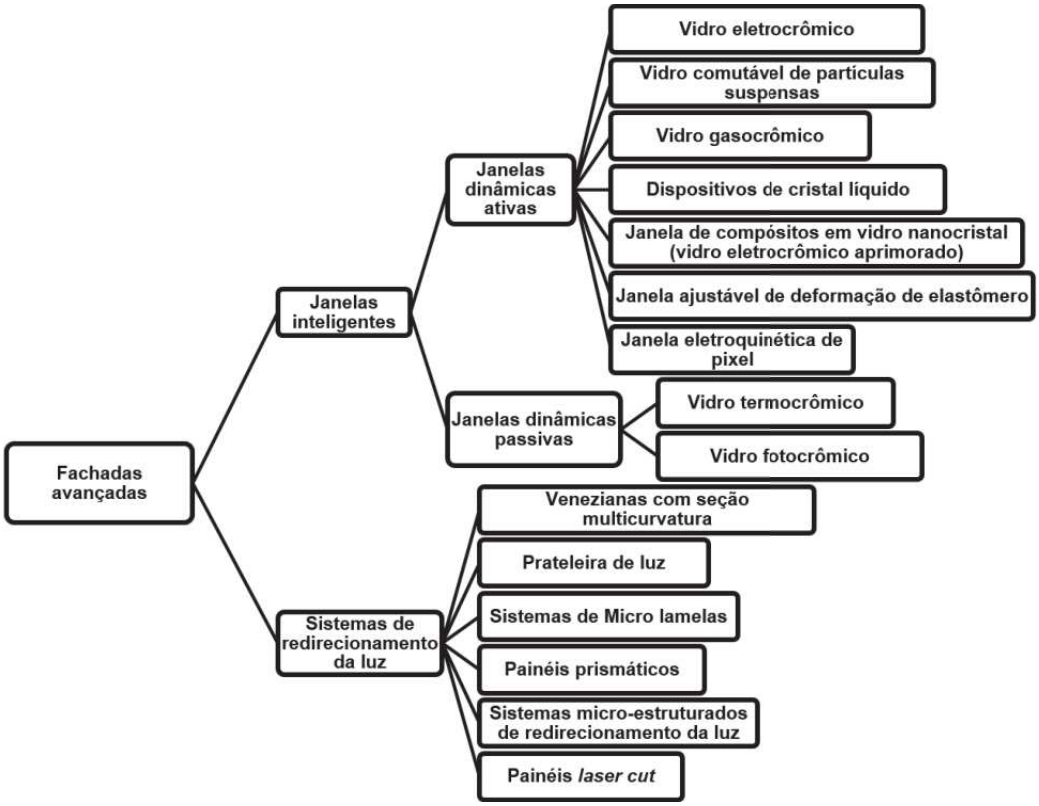


Figura 1 – Fachadas avançadas e proposta de classificação dos materiais inovadores transparentes

4.1. Janelas inteligentes – *smart windows*

A partir da década de 1980 duas tecnologias foram desenvolvidas: o vidro termocrômico e o eletrocrômico. 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 por dióxido de vanádio - VO2 (SALAMATI et al., 2019).

O vidro eletrocrômico, por sua vez, é composto por camada de eletrólito transparente, como por exemplo, um polímero condutor ou condutor iônico inorgânico e outras duas camadas de poliéster transparente. Este elemento condutor está no centro e une dois filmes de óxido nano poroso, tipicamente de óxido de tungstênio (WO_2) 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 (WO_2) o óxido de níquel (NiO). As propriedades ópticas 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 dezenas de minutos para uma grande vidraça (GRANQVIST, 2016). A Figura 2 mostra a composição dos sistemas de vidros termocrômicos e eletrocrômicos. Ressalta-se que as camadas onde o eletrocromismo – mudança de estados ocorrem 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.

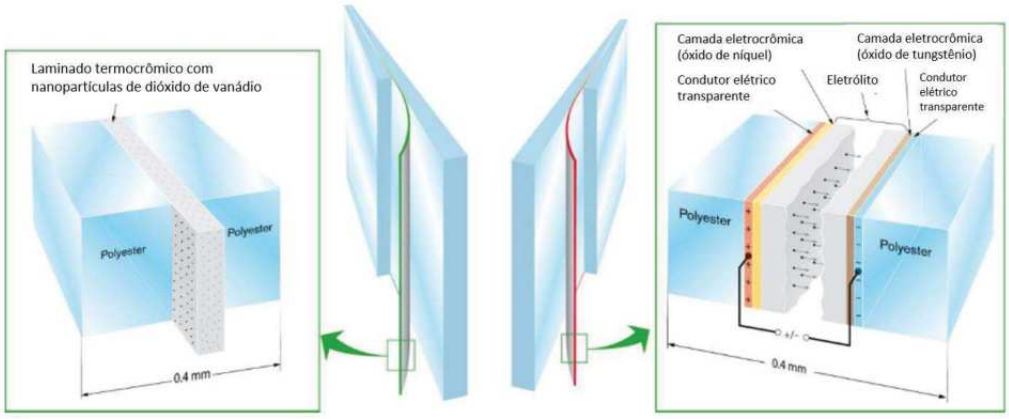


Figura 2 – a) Vidro termocrômico; b) Vidro eletrocrômico. (GRANQVIST, 2016, tradução nossa).

Como mostra a Figura 3, o vidro eletrocrômico é composto por três estados: brilhante, resfriamento e escuro. No estado "brilhante", o vidro funciona como os outros comuns, no qual a radiação, 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.

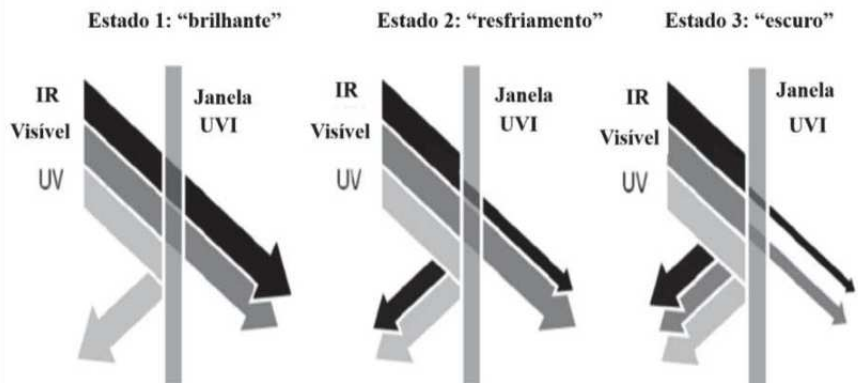


Figura 3 - ilustração da dinâmica das unidades de vidro eletrocrômico (UVI) em cada estado operacional (DEFOREST ET AL., 2017), tradução nossa.

DeForest *et al*. (2017) tiveram como objetivo analisar o vidro eletrocrômico *dual-band eletrochromic glazing* em um edifício residencial e dois comerciais em 16 zonas bioclimáticas nos EUA, incluindo climas quentes, temperados e frios. Foram realizadas simulações nos softwares Energy Plus e os modelos de referência dos edifícios foram 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: "[...] o potencial de economia real pode ser maior para certos tipos de configurações, por exemplo, o uso comum de fachadas envidraçadas, muito comum no desenho de edifícios de escritórios urbanos". Considerando climas quentes, nas regiões bioclimáticas 1A – Miami – quente e úmido, 2A – Houston – predominantemente quente e seco as tecnologias de vidro eletrocrômica testadas se mostram bem promissoras (DEFOREST et al., 2017, p. 108).

No Brasil, Porto (2019) comparou dois vidros simples (3mm e 6mm) e vidro eletrocrômico – SAGE Glass de 9mm com o objetivo de analisar o consumo de energia e conforto térmico provenientes da climatização artificial e ventilação natural. As simulações foram realizadas no *software Energy Plus* em duas zonas bioclimáticas brasileiras ZB 2 – Camaquã- RS e ZB 8 – Manaus – AM. Foi concluído que o vidro eletrocrômico na zona bioclimática 8, teve diminuição de consumo energético conforme o vidro eletrocrômico escurecia por se tratar de clima quente. Na zona bioclimática 2, o vidro eletrocrômico se encontrava nos meses de inverno no estado brilhante, pois a temperatura de *set point* era sempre maior que a temperatura externa. Conclui-se, portanto, sobre o potencial de uso deste tipo de vidro em climas quentes, sendo ainda necessário maior aprofundamento para a gama de climas do contexto brasileiro.

A partir da discussão de mudanças de estados, é possível resumir as propriedades das janelas inteligentes, como mostra a Tabela 3. É importante ressaltar que o vidro eletrocrômico e o de cristal líquido operam em três estados "claro", "resfriamento" e "escuro", enquanto as demais janelas inteligentes operam no estado "claro" e "escuro".

Tabela 3 – Quadro-resumo das propriedades das janelas inteligentes

Propriedades	**Tecnologia de vidro**				
	Termocrômico	Gasocrômico	Eletrocrômico	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 - 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/m²	Não definido	5 – 10 W/m²
Mudança de estado	Minutos	< 1 minuto	5 a 12 minutos	10 segundos	Instantâneo-40ms
Cor	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 e 1,6 W/m²K, conforme a composição da janela				
Controle	Variação de temperatura (68°C)	Adição/ remoção de H_2 ou O_2	Interruptor de parede, controle remoto, sensores (luz e temperatura, timer)		

Fonte: elaboração própria e adaptado de Granqvist (2016) e Casini (2017).

O vidro eletrocrômico 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 DeForest *et al*. (2017) outra característica vantajosa do vidro eletrocrômico são os três estados operacionais, que inclui 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 transmissão luminosa. 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 (GHOSH; NORTON; DUFFY, 2016). No Brasil, o vidro eletrocrômico só foi testado em duas zonas bioclimáticas como descrito por Porto (2019), sem abranger outros contextos climáticos. A seguir, são apresentados os sistemas de redirecionamento da luz natural.

4.2. Sistemas de redirecionamento da luz

A sistematização dos sistemas de redirecionamento da luz incluiu painéis prismáticos, *lasercut panels*, vidros com perfis refletores e sistema de vidro com micro lamelas. Ciampini (2005) avaliou quantitativamente diferentes dispositivos de iluminação natural em Campinas – SP (22° Sul/ 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 espaçados a cada 6 mm, além do vidro simples – 3mm. As medições foram registradas das 8h às 18h, de março a julho. Após os testes, os sistemas *Laser Cut Panel* (LCP) 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 estes sistemas se localizem a pelo menos 1,90m 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 edifícios do tipo centros de compras e usar tecnologias e sistemas avançados para obtenção de conforto térmico e luminoso dos ambientes internos. Nas simulações estáticas, 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. Utilizou-se o vidro incolor de 6mm e dois sistemas de redirecionamento da luz natural: painel prismático, e o sistema com micro lamelas. Concluiu-se que o sistema de micro lamelas 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 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. Concluiu-se que o uso do painel prismático elevou os níveis de iluminância, em comparação ao 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 – sem a utilização de simulações dinâmicas para avaliar o ano inteiro.

A partir de 2015, o desenvolvimento de sistemas micro estruturados traz vantagens em relação aos anteriores, por permitirem um alcance mais profundo da luz natural. Além disso, pode ser aplicado em janelas já existentes ou adicionado como uma camada fina de 3mm entre as lâminas de vidro, caso haja mais de uma camada na janela (IEA, 2016). No Instituto Fraunhofer - Alemanha, componentes micro estruturados 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 4 mostra o protótipo desenvolvido no Instituto Fraunhofer, em Stuttgart (Jakubowsky; Neyer, 2017).

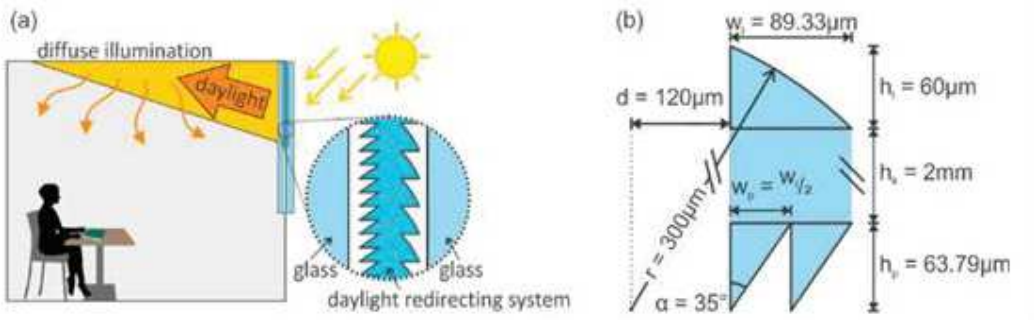


Figura 4 – a) aplicação do sistema de micro-estruturas; b) características físicas (JAKUBOWSKY; NEYER, 2017).

Mueller (2019) estudou a aplicação de dois componentes micro estruturados 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 autonomia de luz natural de 300 lux inferiores a 20%. 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 deste sistema precisam ser realizados. A Tabela 4 apresenta o quadro-resumo com os sistemas discutidos neste item.

Tabela 4 – Quadro-resumo das propriedades dos sistemas de redirecionamento da luz natural

Propriedades	Painéis prismáticos	Painéis *Laser Cut*	Sistemas de microlamelas	Componentes óticos micro estruturados
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/m²K	1,5 W/m²K	1,2 W/m²K	Em estudo
Cor	Incolor	Incolor	Incolor	Incolor
Visibilidade	Translúcido			

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

Como visto neste item, os painéis prismáticos têm valores reduzidos de transmissão luminosa, podendo resultar em valores de iluminância reduzidos nos ambientes internos. Os sistemas de redirecionamento da luz não apresentam as propriedades de mudança de estado possibilitadas pelas janelas inteligentes, permanecem translúcidos e os sistemas são incolores – sem variação de cor.

Os sistemas de micro lamelas apresentam valores maiores de transmissão luminosa, mas possibilitam menor uniformidade de luz natural no ambiente interno. Já os componentes óticos micro estruturados 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 a profundidade do ambiente e reduzir problemas relacionados a ofuscamento próximos à janela.

5. CONCLUSÃO

Como descrito, soluções que empregaram o uso de fachadas avançadas, utilizaram tecnologias inovadoras. As janelas inteligentes e sistemas de redirecionamento da luz natural podem ser incluídos no conceito de "fachadas avançadas". A partir da discussão apresentada, algumas conclusões iniciais são possíveis:

- As janelas inteligentes mostram-se promissoras em climas quentes como o brasileiro, porque filtram a radiação solar infravermelha indesejada e podem manter a parcela visível. Nesta categoria, a tecnologia de vidro eletrocrômico se destaca, porque apresenta maior capacidade de controle das propriedades de transmissão luminosa e fator solar em relação aos demais materiais comparados;
- 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 – como discutido no item 1;
- A partir de 2015, os sistemas de redirecionamento da luz natural evoluíram para os sistemas micro estruturados, sendo que a utilização deles permite área ampliada de iluminação natural devido ao maior alcance da luz natural na profundidade do ambiente, quando comparados aos demais sistemas. Além disso, podem ser adicionados como uma fina camada em cima de vidros existentes, o que reduz custos de manutenção e instalação.

Assim conclui-se que o vidro eletrocrômico e os sistemas micro estruturados de redirecionamento da luz natural, são promissores para climas quentes e de baixas latitudes, e precisam ser mais investigados nos climas brasileiros. Vale ressaltar que há poucos estudos sobre os materiais transparentes e translúcidos inovadores no Brasil. O aprofundamento desta discussão é essencial, e, desta forma, a investigação destes materiais será objeto de investigação da tese de doutorado em andamento.

REFERÊNCIAS

ALVES, Tatiana 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.

ATTIA, Shady *et al*. Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems. Energy and buildings, v. 179, p. 165-182, 2018.

BAHAJ, Abu Bakr S.; JAMES, Patrick A. B.; JENTSCH, Mark 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.

BROTO, Carles. **New facades**. Barcelona: Links International, 2011.

CIAMPINI, Flavia. **Sistemas inovadores de iluminação natural**: estudos de seu desempenho sob condições de céu real em Campinas – SP. 2005. Dissertação. 278f. (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, Campinas, 2005. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/258753. Acesso em: 12 abr. 2021.

CASINI, Marco. Active dynamic windows: a review. **Renewable Energy**, v. 119, p. 923-934, 2017.

CERVO, Amado Luiz; BERVIAN, Pedro Alcino; DA SILVA, Roberto. **Metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

CHAVES, Patricia Winter. **Iluminação natural em escritórios**. 2012. Universidade de Brasília, Brasília, 2012. 163f. Dissertação. (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília. 2012. Disponível em: https://repositorio.unb.br/handle/10482/10757. Acesso: 12. dez. 2019.

COSTA, Joao Francisco Walter; AMORIM, Claudia Naves David Amorim; SILVA, Joara Cronemberger Ribeiro 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.

DEFOREST, Nicholas. A comparative energy analysis of three electrochromic glazing technologies in commercial and residential buildings. **Applied Energy**, v. 192, p. 95-109, 2017.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; JÚNIOR, José Antonio Valle Antunes. **Design science research**: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DUSSAULT, Jean-Michel; GOSSELIN, Louis. 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.

FRABBRINI, Ricardo Nascimento. Poética dos materiais na arquitetura contemporânea. **Rapisódia**, v. 14, p. 5 -32, 2020.

GARROCHO, Juliana Saiter. **Luz natural e projeto de arquitetura**: estratégias para iluminação zenital em centros de compras. 2005. 117f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Brasília, 2005. Disponível em: https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/Pesquisa/luz natural e projeto.pdf. Acesso: 11 dez. 2019.

GHOSH, Aritra; NORTON, Brian; DUFFY, Aidan. Daylighting performance and glare calculation of a suspended particle device switchable glazing. **Solar Energy**, v. 132, p. 114–128, 2016.

GIEDION, S. **Espacio, tiempo y arquitectura**: el futuro de una nueva tradicion. 4. ed. Barcelona: Editorial Científico-Médica, 1968.

GONÇALVES, Joana Carla Soares. 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, 2019, p. 1-22.

GONÇALVES, Joana Carla Soares et al. O pobre desempenho ambiental dos escritórios em caixa de vidro: conforto térmico e energético. **Vitruvius**, n. 160.02, 2021.

GRANQVIST, Claes G. Electrochromics and Thermochromics: Towards a New Paradigm for Energy Efficient Buildings. **Materials Today: Proceedings**, v. 3, p. S2–S11, 2016.

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. Universitätsverlag der TU Berlin: [Berlin], 2016. 97p. Disponível em: http://task50.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Technical_Report_T50_B6_final.pdf. Acesso: 12. nov. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **2020 Highlights**: Task 61 – Integrated solutions for Daylight and Electric Lighting. IEA: Stuttgart, 2020. 2p. Disponível em: https://task61.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/FINAL_Task61_Highlights2020.pdf. Acesso em: 27 jun.. 2021.

JAKUBOWSKY, Michael; NEYER, Andreas. Optimized design of daylight redirection microstructures combined with planar micro structured light sources for high efficient room lighting integrated in building façades. **Energy Procedia**, v. 122, p. 157–162, 2017.

JELLE, Bjørn Petter 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.

LEE, Heangwoo *et al*. Effectiveness of a perforated light shelf for energy saving. **Energy and Buildings**, v. 144, p. 144-151, 2017.

LIMA, Kamila Mendonça de; CARAM, Rosana Maria. Avaliação de sistemas de janela para suporte a decisões de projeto quanto ao equilíbrio de ganhos de luz e calor. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 3, p. 117-133, 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **Balanço Energético Nacional**: relatório síntese. 2020. Rio de Janeiro: EPE, 2019. 295p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 4 abr. 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**. Rio de Janeiro: PROCEL, 2008. Disponível em: http://www.procel.gov.br/main.asp?View={4A5E324F-A3B0-482A-B1CD-F75A2A150480}. Acesso em: 12 nov. 2019.

MUELLER, Helmut F. O. Application of Micro-structured Sunlighting Systems in Different Climatic Zones. **Journal of Daylighting**, v. 6, n. 2, p. 52–59, 2019.

PORTO, Joseane da Silva. **Desempenho termoenergético e ótico da janela inteligente por simulação computacional**. 2019. Tese. 95f. (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019. Disponível em: http://www.guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/4833. Acesso em: 12 dez. 2019.

SALAMATI, Mohammad *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.