

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* AVANÇADO PIUMHI
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

EDUARDO TOLEDO DE OLIVEIRA

VIDROS INTELIGENTES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

PIUMHI
2023

EDUARDO TOLEDO DE OLIVEIRA

VIDROS INTELIGENTES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.º Thiago Pastre Pereira

PIUMHI

2023

O48v Oliveira, Eduardo Toledo de.
Vidros inteligentes na construção civil [manuscrito] /
Eduardo Toledo de Oliveira. – 2024.
75 f. : il. color.

Orientador: Thiago Pastre Pereira.
Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado) – Instituto
Federal Minas Gerais. *Campus Avançado Piumhi*, 2024.

1. Energia - consumo. 2. Construção civil. 3.
Sustentabilidade. I. Pereira, Thiago Pastre. II. Instituto Federal
de Minas Gerais. *Campus Avançado Piumhi*. III. Título.

CDD 691

Catálogo: Andreia Cristina Damasceno - CRB-6/1974



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Avançado Piumhi
Diretoria de Ensino
Docentes Campus Avançado Piumhi
Rua Severo Veloso 1880 - Bairro Bela Vista - CEP 37925-000 - Piumhi - MG
(37)3371-3353 - www.ifmg.edu.br

Eduardo Toledo de Oliveira

VIDROS INTELIGENTES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 21 de agosto de 2024 pela banca examinadora:



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Pastre Pereira, Professor**, em 22/08/2024, às 19:28, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Jéssica Marcelle Corradi Diniz Gonçalves Martins, Professor(a) Substituto(a)**, em 22/08/2024, às 19:44, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Humberto Coelho de Melo, Professor**, em 23/08/2024, às 11:33, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Felipe da Silva Alves, Professor**, em 27/08/2024, às 09:23, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Davidson de Oliveira Rodrigues, Professor**, em 28/08/2024, às 13:29, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadoes> informando o código verificador **2013897** e o código CRC **3E5DED7F**.

23715.000585/2024-92

2013897v1

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a meus pais e meus irmãos que sem eles dificilmente eu chegaria onde estou.

Aos meus colegas e quase uma família construída durante todo esse tempo na faculdade, sem eles seria impossível a conclusão, tais como os Tchoncas que viraram uma segunda família para mim.

A algumas pessoas não menos importantes que influenciaram ou me ajudaram em momentos difíceis, como a Thatiana, meus avós, e outras pessoas que na hora talvez nem conseguiram perceber o que fizeram por mim e seu grau de importância.

Ao meu professor e orientador Thiago Pastre Pereira que quando fiz o pedido para me orientar mesmo com pouco tempo se dispôs a me ajudar.

Resumo

Este trabalho investiga os avanços e as aplicações dos vidros inteligentes na construção civil, destacando seu potencial para promover eficiência energética, conforto ambiental e bem-estar dos ocupantes. Inicialmente, são apresentados os diferentes tipos de vidros inteligentes, como os vidros de cristal líquido, eletrocromicos e fotocromicos, com uma análise detalhada de suas características e funcionamento. A pesquisa examina como a modulação da transmissão de luz, através da aplicação de campos elétricos, influencia a orientação molecular dos cristais líquidos e, conseqüentemente, a transmissão de luz. Além disso, o estudo analisa os impactos dos vidros inteligentes na eficiência energética e no controle solar em edifícios, demonstrando como a adaptação desses vidros às condições ambientais pode otimizar a entrada de luz natural, reduzindo o consumo de energia para iluminação e climatização. Também são exploradas as possibilidades de integração dos vidros inteligentes com sistemas de automação, proporcionando maior eficiência operacional. Por fim, são discutidos os aspectos econômicos e de sustentabilidade, enfatizando os benefícios ambientais e de bem-estar proporcionados por essa tecnologia inovadora. O trabalho conclui com uma reflexão sobre os avanços recentes e as perspectivas futuras para o desenvolvimento e implementação dos vidros inteligentes na construção civil, consolidando sua relevância como uma solução promissora para edificações sustentáveis e tecnologicamente avançadas.

Palavras-chaves: energia-consumo; construção civil; sustentabilidade.

Abstract

This work investigates the advances and applications of smart glass in civil construction, highlighting its potential to promote energy efficiency, environmental comfort, and occupant well-being. Initially, different types of smart glass are presented, such as liquid crystal, electrochromic, and photochromic glasses, with a detailed analysis of their characteristics and functioning. The research examines how light transmission modulation, through the application of electric fields, influences the molecular orientation of liquid crystals and consequently light transmission. Additionally, the study analyzes the impacts of smart glass on energy efficiency and solar control in buildings, demonstrating how the adaptation of these glasses to environmental conditions can optimize natural light entry, reducing energy consumption for lighting and climate control. The possibilities of integrating smart glass with automation systems are also explored, providing greater operational efficiency. Finally, economic and sustainability aspects are discussed, emphasizing the environmental and well-being benefits provided by this innovative technology. The work concludes with a reflection on recent advancements and future prospects for the development and implementation of smart glass in civil construction, consolidating its relevance as a promising solution for sustainable and technologically advanced buildings.

Keywords: energy-consumption; civil construction; sustainability.

Lista de Figuras

Figura 1 - Vidro Recozido.....	15
Figura 2 - Vidro Temperado.....	16
Figura 3 - Vidro Laminado.....	17
Figura 4 - Vidro Float.....	17
Figura 5 - Vidro Anti-reflexo.....	18
Figura 6 - Transição de fase do Cristal Líquido.....	19
Figura 7 - Banheiros públicos japoneses com cristal líquido.....	21
Figura 8 - Cristal Líquido.....	24
Figura 9 - Vidro Eletrocromico.....	26
Figura 10 - Vidro Eletrocromico na construção civil.....	30
Figura 11 - Vidro Fotocromico em lentes de óculos.....	35
Figura 12 - Samsung SDS Global Headquarters, Seul, Coreia do Sul.....	37
Figura 13 - Museum of the Future, Dubai, Emirados Árabes Unidos.....	38
Figura 14 - Vidro Fotovoltaico.....	41
Figura 15 - One Central Park, Sydney, Austrália.....	43
Figura 16 - One Angel Square, Manchester.....	46
Figura 17 - The Edge, Amsterdam.....	48

Sumário

1. Introdução.....	9
2. Metodologia.....	12
3. Objetivo.....	14
4. Referencial Teórico.....	15
4.1 Tipos convencionais de vidros.....	15
4.2 Cristal líquido.....	18
4.2.1 Princípios de Funcionamento do Vidro Inteligente de Cristal Líquido.....	19
4.2.2 Aplicações e Potencialidades do Vidro Inteligente de Cristal Líquido.....	23
4.3 Eletrocromica.....	26
4.3.1 Funcionamento e Tecnologia dos Vidros Inteligentes Eletrocromicos.....	26
4.3.2 Aplicações e Benefícios dos Vidros Inteligentes Eletrocromicos.....	29
4.4 Fotocromico.....	33
4.4.1 Tecnologia e Funcionamento do Vidro Inteligente Fotocromico.....	33
4.4.2 Aplicações e Benefícios do Vidro Inteligente Fotocromico.....	37
4.5 Vidros Fotovoltaicos Integrados.....	41
4.5.1 Integração de Tecnologia Fotovoltaica em Vidros Inteligentes.....	41
4.5.2 Sustentabilidade e Eficiência Energética em Edifícios com Vidros Fotovoltaicos.	45
4.6 Sistemas de Controle e Automação em Vidros Inteligentes.....	50
4.6.1 Tecnologias de Controle em Vidros Inteligentes.....	50
4.6.2 Integração com Sistemas de Automação Predial.....	53
4.7 Aspectos Econômicos e Sustentabilidade na Utilização de Vidros Inteligentes...	56
4.7.1 Impacto Econômico na Utilização de Vidros Inteligentes.....	56
4.7.2 Sustentabilidade na Utilização de Vidros Inteligentes.....	57
5. Resultados e Discussão.....	62
6. Conclusão.....	64
Referências.....	66

1. Introdução

Na evolução constante das construções modernas, o uso do vidro emergiu como uma componente fundamental, desempenhando um papel significativo na estética e funcionalidade arquitetônica. Desde os primórdios, o vidro tem sido parte integral da arquitetura, passando por diversas fases de aprimoramento e aperfeiçoamento. Inicialmente, o vidro recozido foi amplamente empregado, seguido pelo advento do vidro temperado, que ofereceu maior resistência mecânica e segurança. Posteriormente, a introdução do vidro laminado e aramado contribuiu para melhorias na segurança e controle de fragmentação (VAN DER VOORDT; VAN WEGEN, 2013).

O processo de elaboração do vidro, datado historicamente, reflete uma trajetória de refinamento técnico ao longo dos séculos. A fusão de matérias-primas como sílica, soda e cal em altas temperaturas resulta na formação do vidro, cuja maleabilidade inicial permite uma diversidade de aplicações. Ao longo do tempo, a busca por propriedades específicas levou ao desenvolvimento de variantes como o vidro float, caracterizado por sua superfície lisa e uniforme, e o vidro impresso, que agrega elementos decorativos (SETZ; DA SILVA, 2019).

Nesse contexto evolutivo, o vidro não apenas evoluiu em termos de composição e propriedades físicas, mas também se tornou um substrato para tecnologias inovadoras. A transição dos vidros convencionais para os inteligentes, objeto central desta pesquisa, representa um marco na interseção entre tradição e modernidade na construção civil. Neste contexto, os vidros inteligentes emergem como uma contribuição significativa, apresentando potencial para redefinir o paradigma da eficiência energética e conforto ambiental nas edificações. A capacidade desses materiais de alterar suas propriedades ópticas em resposta a estímulos externos representa um avanço notável na busca por soluções ambientalmente responsáveis. Este trabalho se propõe a explorar de forma abrangente o estado atual da tecnologia de vidros inteligentes na construção civil, avaliando seus benefícios, desafios e potenciais aplicações em diversas vertentes do setor (GONÇALVES, 2012).

A crescente preocupação com a eficiência energética nas edificações tem impulsionado a adoção de tecnologias voltadas à redução do consumo de energia. Neste contexto, os vidros inteligentes se destacam como um componente crucial na busca por construções energeticamente eficientes e sustentáveis. A capacidade desses materiais de ajustar suas propriedades em resposta a variáveis ambientais, como a luminosidade e a temperatura, promove uma gestão dinâmica da entrada de luz e calor nos espaços internos, minimizando a dependência de sistemas artificiais de climatização e iluminação. Tal capacidade, aliada a uma considerável redução do gasto energético, posiciona os vidros inteligentes como um elemento de suma importância no contexto da construção civil moderna (DE OLIVEIRA; SEMAAN; PONZIO, 2015).

Além dos benefícios evidentes para a eficiência energética, os vidros inteligentes também exercem um impacto positivo no conforto e bem-estar dos ocupantes de edificações. A capacidade de controlar a transmissão de luz natural de acordo com as preferências individuais contribui para a criação de ambientes mais agradáveis e funcionais. A atenuação adequada da incidência solar excessiva, por exemplo, não apenas reduz o desconforto térmico, mas também protege contra a exposição aos raios ultravioleta, promovendo a saúde e o bem-estar dos usuários. Assim, a incorporação de vidros inteligentes não apenas atende a requisitos funcionais, mas também promove uma melhor qualidade de vida no interior dos espaços construídos (COSTA; AMORIM, 2021).

Contudo, apesar do potencial promissor dos vidros inteligentes, sua adoção em larga escala na construção civil ainda enfrenta desafios relevantes. Aspectos técnicos, como a durabilidade e a complexidade de instalação, bem como questões econômicas, como o custo inicial mais elevado em comparação com vidros convencionais, constituem barreiras substanciais para a sua plena implementação. Portanto, é imperativo conduzir uma avaliação criteriosa dos custos e benefícios associados à integração de vidros inteligentes em projetos de construção, visando a uma tomada de decisão fundamentada e equilibrada (ANDRADE, 2022).

Neste contexto, este trabalho se propõe a fornecer uma análise abrangente dos vidros inteligentes na construção civil, abordando não apenas seus benefícios notáveis, mas também os desafios inerentes à sua implementação. Através de uma

revisão da literatura, busca-se fornecer uma visão holística sobre o estado atual dessa tecnologia e suas perspectivas para o futuro da indústria da construção civil.

2. Metodologia

Este trabalho utiliza uma pesquisa básica com abordagem qualitativa e quantitativa (mista), destinada a explorar o estado atual e as perspectivas dos vidros inteligentes na construção civil. A escolha por uma pesquisa de caráter básico deve-se ao fato de que este estudo visa a ampliação do conhecimento científico sobre o tema, sem necessariamente ter um foco imediato em aplicações práticas.

A pesquisa é predominantemente de natureza bibliográfica, sendo realizada uma extensa revisão da literatura, incluindo estudos científicos, artigos, dissertações e normas técnicas publicadas em bases de dados como Google Scholar, Scielo, ScienceDirect, entre outras.

A abordagem mista foi escolhida para incluir uma análise qualitativa dos aspectos descritivos das tecnologias e benefícios dos vidros inteligentes, bem como uma análise quantitativa dos dados sobre eficiência energética e impacto econômico, que são extraídos de estudos de caso e análises empíricas.

Foi realizada uma extensa pesquisa em bases de dados acadêmicas, tais como Google Scholar e Scielo, utilizando uma combinação de termos de busca específicos, incluindo "vidros inteligentes", "vidros de controle solar", "eficiência energética em construções" e termos correlacionados. A seleção inicial de artigos baseou-se em critérios de relevância, data de publicação e qualidade dos periódicos, visando assegurar a inclusão de contribuições científicas atualizadas e confiáveis.

Os artigos e estudos selecionados foram então categorizados com base em temas pertinentes, abrangendo aspectos técnicos, benefícios ambientais, desafios de implementação e potenciais aplicações dos vidros inteligentes na construção civil. Esta abordagem facilitou uma análise temática aprofundada, permitindo uma compreensão holística das diversas dimensões desta tecnologia. A categorização foi conduzida de maneira iterativa, incorporando novas descobertas e insights à medida que a revisão avançava.

A pesquisa se limita à análise de fontes bibliográficas disponíveis em bases de dados abertas e revistas científicas. Não foram conduzidos experimentos práticos ou estudos de campo, sendo essa uma sugestão para futuros trabalhos que

busquem validar os achados em projetos de construção civil real.

3. Objetivo

O objetivo deste trabalho é investigar o estado atual, as aplicações e o potencial futuro dos vidros inteligentes na construção civil, com foco em como essa tecnologia pode contribuir para a eficiência energética, o conforto ambiental e a sustentabilidade em edificações modernas. O estudo busca, além disso, demonstrar a existência e as diversas utilidades dos vidros inteligentes, explorando as diferentes tipologias existentes, como os vidros de cristal líquido, eletrocromáticos, fotocromáticos e fotovoltaicos.

O trabalho também pretende avaliar o impacto econômico da adoção desses materiais inovadores, além de discutir os desafios técnicos e de implementação que limitam sua popularização no setor de construção. Ao fornecer uma visão abrangente e atualizada sobre as potencialidades dos vidros inteligentes, o objetivo é contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e sustentáveis em edificações, oferecendo subsídios para que profissionais e pesquisadores possam aplicar e replicar essa tecnologia em projetos futuros.

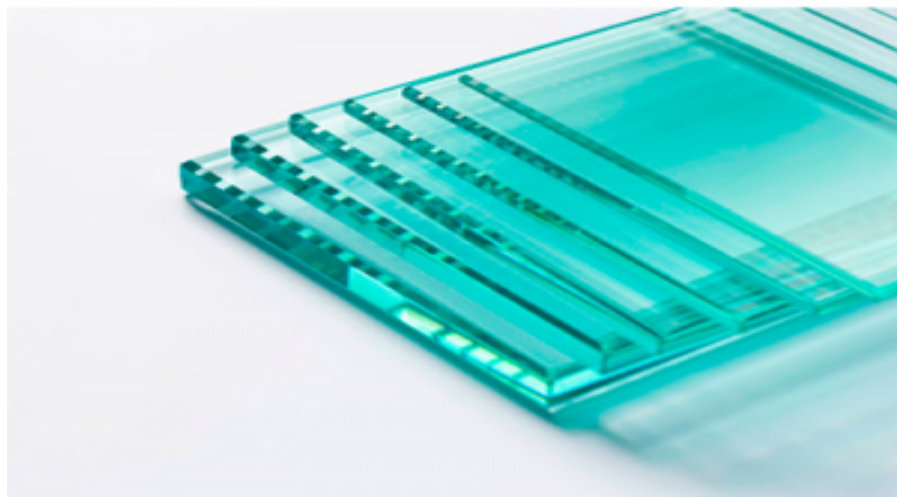
4. Referencial Teórico

4.1 Tipos convencionais de vidros

O vidro, uma substância que remonta à antiguidade, tem desempenhado um papel crucial na construção civil ao longo dos séculos. Inicialmente, era produzido artesanalmente, mas com a evolução das técnicas, tornou-se um material essencial em diversas aplicações. Essa trajetória revela a adaptação do vidro às necessidades da construção civil, desde suas formas mais rudimentares até as sofisticadas tecnologias contemporâneas, como os vidros inteligentes, objeto principal desta pesquisa (LE BOURHIS, 2014).

O vidro recozido, obtido por meio do processo de recozimento, representa uma fase inicial no desenvolvimento do vidro como material construtivo. Esse método envolve o aquecimento do vidro seguido de um resfriamento lento, visando reduzir tensões internas. Embora possua uma fragilidade comparativa, o vidro recozido permanece relevante na construção devido à sua facilidade de fabricação e custo acessível, sendo amplamente utilizado em construções residenciais e comerciais (KÜCHEMANN et al., 2018).

Figura 1 - Vidro Recozido.

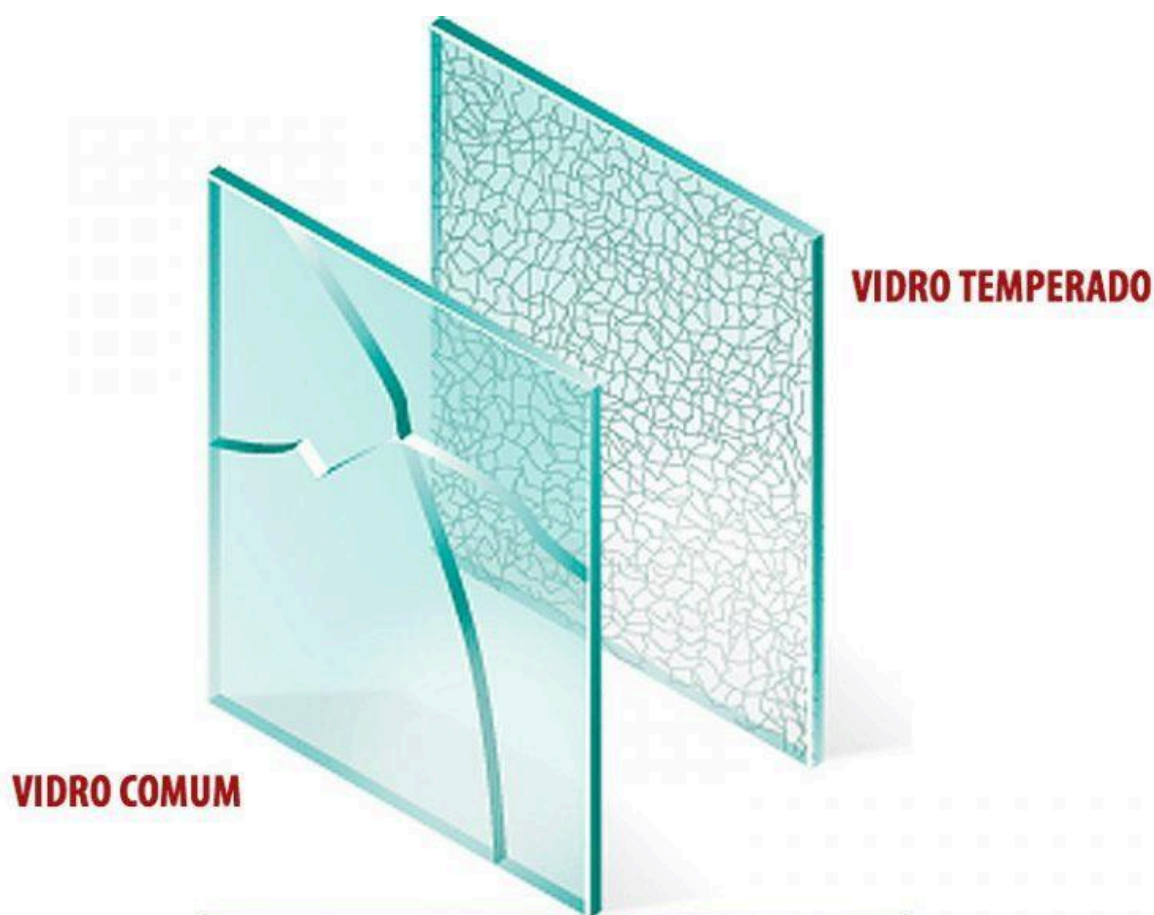


Fonte: <https://archglassbrasil.com.br/dicionario/vidro-recozido/>

O vidro temperado é uma inovação significativa na evolução do vidro para

aplicações construtivas. Obtido por tratamento térmico controlado, esse tipo de vidro apresenta uma resistência mecânica superior. Em situações de quebra, fragmenta-se em pequenos pedaços menos cortantes, minimizando os riscos associados. Portanto, o vidro temperado é frequentemente escolhido em aplicações onde a segurança é prioritária, como fachadas de edifícios e portas (BALAN; ACHINTHA, 2015).

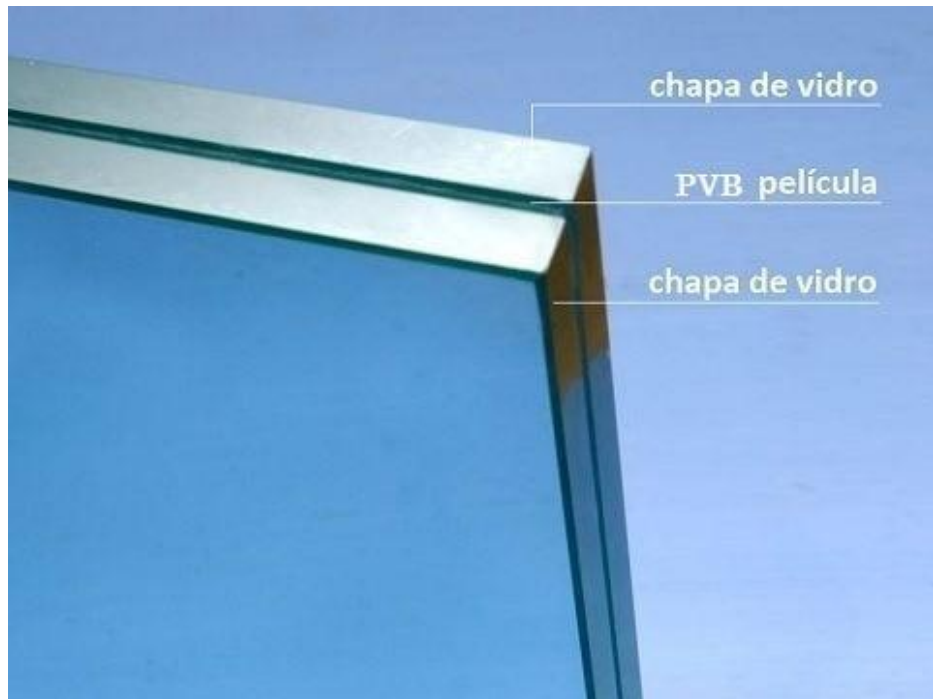
Figura 2 - Vidro Temperado.



Fonte: <https://www.jusbrasil.com.br/artigos/vidro-temperado-laminado-comum-entre-outros/844438190>

O vidro laminado, constituído por camadas de vidro unidas por uma película plástica, representa um avanço na busca por segurança. Sua característica distintiva é a capacidade de permanecer unido mesmo quando quebrado, contribuindo para a minimização dos riscos associados à quebra de vidro. Esse tipo de vidro é comumente utilizado em janelas, fachadas e vidros de automóveis oferecendo uma solução segura e eficiente (MARTÍN et al., 2020).

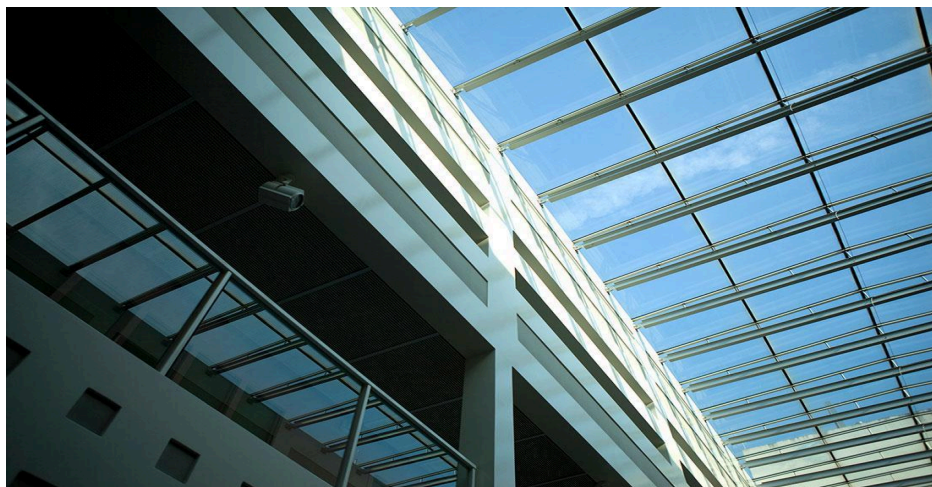
Figura 3 - Vidro Laminado.



Fonte: <https://www.boxparabanheiro.ind.br/vidro-comum-ou-laminado/vidro-laminado-incolor>

O vidro *float* é uma inovação na busca por superfícies lisas e uniformes. Produzido por meio de um método de flutuação em um leito de estanho fundido, esse tipo de vidro é valorizado por sua clareza óptica e estética. Comumente utilizado em janelas e portas, o vidro *float* atende à demanda por transparência e simplicidade visual (UUSITALO, 2014).

Figura 4 - Vidro Float.



Fonte: <https://www.prismatic.com.br/o-que-e-o-vidro-float/>

O vidro anti-reflexo destaca-se por sua capacidade de minimizar reflexos indesejados. Amplamente utilizado em fachadas de edifícios, vitrines e monitores, esse tipo de vidro melhora a visibilidade em ambientes externos, atendendo às demandas estéticas e funcionais da arquitetura moderna (GARLISI et al., 2020).

Figura 5 - Vidro Anti-reflexo.



Fonte: <https://www.glassmanufacturerchina.com/pt/products/China-2mm-anti-reflective-glass-factory-2mm-AR-coating-glass-for-picture-frame.html>

A rica diversidade dos tipos convencionais de vidro reflete não apenas a evolução tecnológica desse material, mas também sua capacidade de se adaptar às necessidades específicas da construção civil. Esses vidros, cada um com suas propriedades distintas, oferecem soluções versáteis e eficientes, contribuindo para a segurança, eficiência energética e estética dos edifícios contemporâneos. Nessa dinâmica evolutiva, o vidro continua a desempenhar um papel essencial na arquitetura, com perspectivas inovadoras e tecnológicas para o futuro (LE BOURHIS, 2014).

4.2 Cristal líquido

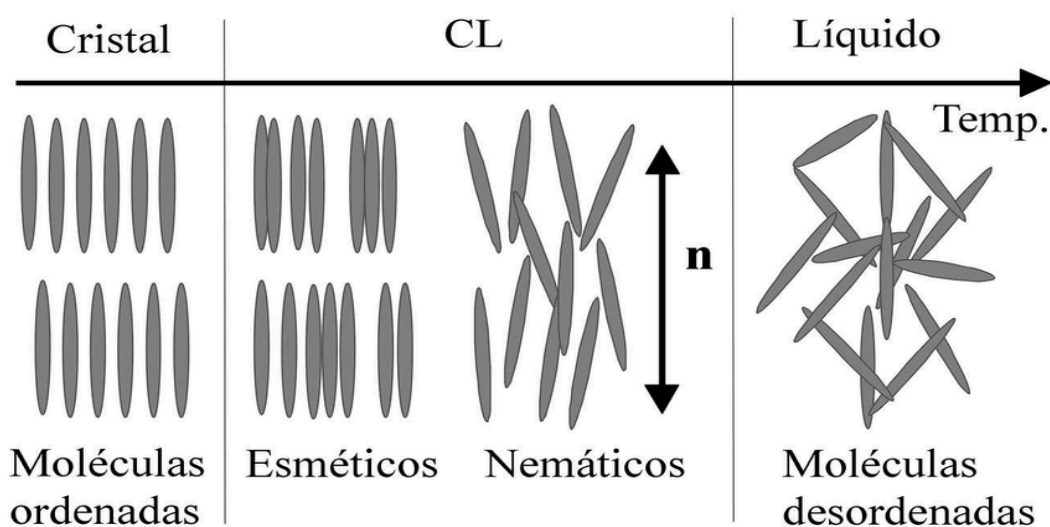
Embora os vidros comuns tenham desempenhado um papel fundamental em inúmeras aplicações, variando de janelas simples a componentes estruturais

sofisticados, os avanços tecnológicos têm nos levado a um limiar de inovação significativa. Em contraste com as características estáticas dos vidros tradicionais, a emergência dos vidros inteligentes representa um salto quântico em funcionalidade e eficiência. Estes não são meros elementos passivos; eles são sistemas dinâmicos, capazes de alterar suas propriedades ópticas e térmicas em resposta a estímulos externos, oferecendo assim uma gama de benefícios que incluem controle de privacidade, eficiência energética e conforto ambiental. Nos tópicos subsequentes, exploraremos diversos tipos de vidros inteligentes. Cada tipo representa uma ponte entre a funcionalidade tradicional e as demandas de uma sociedade que busca cada vez mais por soluções sustentáveis e interativas para os espaços em que vivemos e trabalhamos.

4.2.1 Princípios de Funcionamento do Vidro Inteligente de Cristal Líquido

Os cristais líquidos, componentes fundamentais na composição de vidros inteligentes, são substâncias que exibem propriedades intermediárias entre os estados sólido e líquido. Esta singularidade surge da organização molecular altamente anisotrópica, na qual as moléculas mantêm uma relativa mobilidade rotacional, enquanto permanecem alinhadas em direções preferenciais. Esta disposição molecular singular confere aos cristais líquidos propriedades ópticas e estruturais notavelmente distintas quando comparadas com estados sólidos tradicionais ou líquidos isotrópicos (COSTA; AMORIM, 2021).

Figura 6 - Transição de fase do Cristal Líquido.



Fonte: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-ilustrativo-do-aparecimento-das-mesofa>

A composição química dos cristais líquidos é caracterizada por moléculas alongadas ou discoidais, muitas vezes conjugadas, que facilitam a formação de fases anisotrópicas. Grupos funcionais específicos, como anéis aromáticos, ligações duplas e ramificações laterais, desempenham um papel crucial na organização molecular. Além disso, a presença de átomos de carbono insaturados e cadeias hidrofóbicas contribui para a mobilidade parcial das moléculas, permitindo a adaptação às variações de campo elétrico (COBOS et al., 2013).

A estrutura molecular dos cristais líquidos adquire particular importância na operação dos vidros inteligentes. Os sistemas de cristais líquidos utilizados nesses dispositivos frequentemente exibem uma organização nemática ou lamelar, onde as moléculas estão alinhadas preferencialmente em direções específicas. Esta orientação molecular pode ser controlada por meio da aplicação de um campo elétrico externo, proporcionando a capacidade de transição entre estados opacos e transparentes (OLIVEIRA, 2019).

Ademais, a estrutura molecular dos cristais líquidos é intimamente relacionada à sua temperatura de transição de fase, um aspecto crucial na operação dos vidros inteligentes. Materiais com transições de fase bem definidas e ajustáveis permitem uma resposta rápida e precisa à variação de temperatura ou campo elétrico, determinando a eficácia do controle óptico proporcionado pelos vidros inteligentes (MACHADO et al., 2022).

A modulação da transmissão de luz em vidros inteligentes é um fenômeno essencialmente atribuído à aplicação de um campo elétrico externo sobre os cristais líquidos que compõem o material. Este processo intrincado repousa na capacidade dos cristais líquidos de reorganizar suas estruturas moleculares quando submetidos a estímulos elétricos. Em estado não excitado, as moléculas dos cristais líquidos assumem uma orientação preferencial, resultando em uma transmissão de luz limitada. No entanto, ao aplicar um campo elétrico, as moléculas se alinham em uma configuração mais favorável à passagem de luz, alterando significativamente as propriedades ópticas do vidro (SANTOS et al., 2016).

A aplicação do campo elétrico induz uma rotação controlada das moléculas de

cristal líquido, alterando a orientação global do material. Esta reorientação molecular ocorre de forma direcional, dependendo da polaridade e magnitude do campo aplicado. Portanto, a transmissão de luz através do vidro inteligente pode ser precisamente ajustada, variando de opaca a completamente transparente, conforme a intensidade do campo elétrico (SANTOS et al., 2016).

Figura 7 - Banheiros públicos japoneses com cristal líquido.



Fonte:<https://coisasdojapao.com/2020/08/os-banheiros-publicos-transparentes-no-japao-a-invencao-para-acabar-com-os-problemas/>

Ademais, a resposta da modulação da transmissão de luz é notavelmente rápida, com tempos de comutação na ordem de milissegundos. Esta rápida

adaptação das propriedades ópticas é um atributo crucial dos vidros inteligentes, permitindo a sua aplicação em contextos dinâmicos, como na regulação de iluminação em ambientes internos, reduzindo a necessidade de luz artificial e, por conseguinte, economizando energia (PORTO, 2019).

Vale destacar que a eficácia da modulação da transmissão de luz está intimamente ligada à composição e estrutura molecular dos cristais líquidos utilizados. Materiais com orientação molecular bem definida e uma transição de fase clara apresentam uma resposta mais precisa e controlável à aplicação do campo elétrico, garantindo um desempenho ótico confiável ao longo do tempo (FONSECA, 2017).

Os estados de cristal líquido, notáveis pela sua organização molecular peculiar, desempenham um papel preponderante nas propriedades ópticas e comportamentais dos vidros inteligentes. Dentre os estados mais notáveis, destaca-se o estado nemático, caracterizado pela orientação das moléculas em direções preferenciais, apesar da mobilidade rotacional que ainda é mantida. Este estado é amplamente empregado em vidros inteligentes devido à sua capacidade de resposta ao campo elétrico, permitindo a variação na transmissão de luz conforme a orientação molecular é alterada (PYRRHO; SCHRAMM, 2016).

A seleção do estado de cristal líquido é uma etapa crítica na concepção de vidros inteligentes, influenciando diretamente suas propriedades ópticas e funcionais. A escolha entre os diversos estados disponíveis implica uma ponderação entre a velocidade de resposta, a capacidade de orientação molecular e a estabilidade do material. Esta seleção é essencial para assegurar que o vidro inteligente atenda aos requisitos específicos de sua aplicação, seja no controle de luminosidade em ambientes internos, na eficiência energética ou em outras funcionalidades desejadas (FRANCO, 2017).

Além disso, é importante ressaltar que a aplicação de diferentes estados de cristal líquido em vidros inteligentes abre perspectivas para uma gama diversificada de aplicações. Desde a regulação da transmissão de luz em fachadas de edifícios até a criação de sistemas de privacidade adaptativos em ambientes internos, a escolha do estado de cristal líquido é um fator determinante no desempenho e na versatilidade destes materiais (CUNHA, 2013).

4.2.2 Aplicações e Potencialidades do Vidro Inteligente de Cristal Líquido

O vidro inteligente de cristal líquido emerge como uma inovação significativa no contexto da eficiência energética em edifícios. Sua capacidade de resposta dinâmica ao controle solar, aliada à habilidade de otimizar a entrada de luz natural, desempenha um papel vital na redução do consumo de energia associado à climatização. Ao modular a transmissão de luz em resposta às condições ambientais, o vidro inteligente contribui para minimizar a carga térmica sobre os sistemas de ar condicionado e aquecimento, resultando em uma significativa economia energética ao longo do ciclo de vida da edificação (LANGARO et al., 2013).

O Vidro Inteligente de Cristal Líquido representa uma inovação crucial na construção civil contemporânea. Sua capacidade de modular a transmissão de luz por meio de campos elétricos, proporcionando controle dinâmico sobre a opacidade, tem implicações significativas para a eficiência energética e o conforto ambiental nos edifícios. Essa tecnologia avançada não apenas permite a otimização da entrada de luz natural, reduzindo a dependência de iluminação artificial e, conseqüentemente, o consumo de energia, mas também oferece uma solução dinâmica que se adapta às necessidades dos ocupantes (HEMAIDA et al., 2020).

A eficiência energética proporcionada pelo vidro inteligente é particularmente evidente na redução da necessidade de sistemas de climatização. A capacidade de ajustar a transmissão de luz de acordo com a incidência solar direta permite uma gestão mais efetiva do ganho de calor durante os períodos de alta insolação. Isso resulta em uma menor demanda por resfriamento mecânico, proporcionando uma redução tangível nos custos operacionais associados à energia em edifícios comerciais e residenciais (COSTA; AMORIM, 2022).

Além disso, o controle solar conferido pelo vidro inteligente tem implicações diretas na atenuação de picos de demanda de eletricidade em horários de alta insolação. Ao minimizar a entrada de radiação solar excessiva, o vidro contribui para a estabilização da temperatura interna, mitigando a necessidade de sobrecarregar os sistemas de climatização para manter o conforto térmico. Essa contribuição para a gestão da demanda de energia elétrica é de particular importância em regiões com climas de alta amplitude térmica (BISOYI; LI, 2021).

Figura 8 - Cristal Líquido.



Fonte: <https://archglassbrasil.com.br/artigos/vidro-polarizado-o-que-e/>

Por conseguinte, a implementação de vidros inteligentes de cristal líquido como parte integrante do envelope construtivo de um edifício pode resultar em ganhos substanciais em termos de eficiência energética. A capacidade de otimizar o controle solar, aliada à maximização do aproveitamento da luz natural, confere a estes vidros um papel destacado na redução do consumo energético e na minimização do impacto ambiental das edificações. Essa tecnologia, ao alinhar funcionalidade e sustentabilidade, posiciona-se como uma contribuição valiosa no contexto da construção sustentável e na busca por ambientes construídos mais eficientes e ambientalmente responsáveis (KHANDELWALL, 2015).

A aplicação de vidros inteligentes de cristal líquido tem sido amplamente explorada em uma variedade de contextos, desde ambientes comerciais até espaços residenciais. Em ambientes de escritório, esses vidros desempenham um papel crucial na otimização da eficiência energética e na promoção do conforto dos ocupantes. A capacidade de ajustar dinamicamente a transmissão de luz em resposta às condições ambientais proporciona uma gestão eficaz do ganho de calor solar, resultando em uma redução significativa na necessidade de sistemas de climatização. A maximização do aproveitamento da luz natural contribui para a criação de ambientes de trabalho mais produtivos e agradáveis, ao mesmo tempo em que reduz a dependência de iluminação artificial (GAO et al., 2015).

A integração dos vidros inteligentes de cristal líquido com sistemas de automação predial representa um avanço significativo na busca por ambientes construídos altamente eficientes e confortáveis. Por meio da comunicação direta com sistemas de controle automatizado, esses vidros adquirem a capacidade de

responder de maneira sinérgica às variáveis ambientais e às preferências dos ocupantes. Essa integração oferece uma gestão mais refinada e adaptativa das propriedades ópticas dos vidros, promovendo tanto a eficiência operacional quanto o conforto ambiental em edifícios (WONG; CHAN, 2014).

A interconexão entre os vidros inteligentes e os sistemas de automação predial é viabilizada por meio de sensores e atuadores estrategicamente posicionados. Sensores de luminosidade, temperatura e presença, por exemplo, fornecem dados em tempo real sobre as condições ambientais e as atividades dos ocupantes. Essas informações são então processadas por um sistema de controle centralizado que, por sua vez, ajusta as propriedades dos vidros para otimizar a entrada de luz natural, controlar o ganho térmico e preservar a privacidade, entre outros aspectos (RUGGIERO et al., 2022).

A integração também permite a criação de perfis de preferência personalizados para os ocupantes. Através de interfaces intuitivas, os usuários podem definir suas preferências em relação à luminosidade, privacidade e conforto térmico. Essas preferências são então comunicadas ao sistema de automação, que coordena as configurações dos vidros para atender às demandas individuais. Dessa forma, a integração promove um ambiente construído mais centrado no usuário, proporcionando um nível superior de conforto e satisfação (CASINI, 2014).

A integração dos vidros inteligentes com sistemas automatizados oferece benefícios tangíveis em termos de eficiência energética. A capacidade de ajustar dinamicamente as propriedades ópticas dos vidros em resposta às condições ambientais e às preferências dos ocupantes resulta em uma gestão mais eficaz do consumo de energia associado à iluminação e climatização. Essa otimização contribui para a redução dos custos operacionais e para a minimização do impacto ambiental dos edifícios (ISLAM et al., 2023).

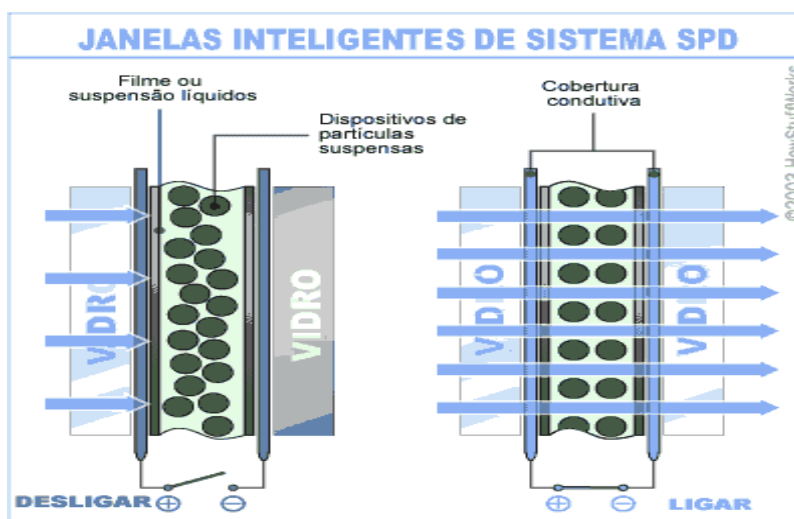
4.3 Eletrocromática

4.3.1 Funcionamento e Tecnologia dos Vidros Inteligentes Eletrocromáticos

O vidro inteligente com cristal líquido e o vidro inteligente eletrocromático são duas tecnologias inovadoras que permitem a alteração das propriedades ópticas do vidro através de estímulos elétricos, porém operam de maneiras distintas. Enquanto o vidro inteligente com cristal líquido utiliza uma camada de cristais líquidos que podem ser alinhados para alternar entre os estados de opacidade e transparência mediante a aplicação de corrente elétrica, o vidro inteligente eletrocromático emprega uma camada de material que muda de cor quando uma pequena corrente elétrica é aplicada, proporcionando uma variação na quantidade de luz transmitida pelo vidro.

Os vidros inteligentes eletrocromáticos operam com base em princípios eletrocromáticos, um fenômeno notável que permite a alteração da opacidade do material em resposta à aplicação de um campo elétrico externo. Essa capacidade é intrinsecamente ligada à estrutura molecular dos materiais utilizados na fabricação dos vidros. A estrutura molecular desses materiais é composta por camadas de íons positivos e negativos, conhecidos como íons cátions e ânions, respectivamente. Quando um campo elétrico é aplicado, os íons cátions e ânions migram em direções opostas, resultando em uma mudança na opacidade do vidro (GRANQVIST, 2014).

Figura 9 - Vidro Eletrocromático.



A influência do campo elétrico na estrutura molecular dos vidros eletrocromicos é notavelmente significativa. Quando não há aplicação de campo elétrico, os íons cátions e ânions estão distribuídos aleatoriamente na estrutura, resultando em uma opacidade relativamente alta do material. No entanto, quando um campo elétrico é introduzido, os íons são movidos para camadas específicas da estrutura, levando a uma reorganização da disposição molecular. Isso resulta em uma mudança na opacidade do vidro, tornando-o mais transparente ou opaco, dependendo da polaridade do campo elétrico aplicado (BRZEZICKI, 2021).

Cabe ressaltar que a velocidade e a eficácia da mudança de opacidade nos vidros eletrocromicos estão diretamente relacionadas à intensidade do campo elétrico aplicado. Quanto maior a magnitude do campo elétrico, mais rápida e pronunciada é a alteração na opacidade do vidro. Essa relação entre a intensidade do campo elétrico e a resposta eletrocromica dos vidros é um aspecto crucial na concepção e operação desses materiais em aplicações práticas (CANNAVALE et al., 2020).

Vale ressaltar que a escolha dos materiais utilizados nos vidros eletrocromicos desempenha um papel significativo na eficácia dos princípios eletrocromicos. Compostos químicos específicos e a estrutura molecular intrínseca dos materiais determinam a sensibilidade à aplicação do campo elétrico e, conseqüentemente, a amplitude da mudança na opacidade. Portanto, a seleção criteriosa dos materiais é essencial para assegurar um desempenho ótimo dos vidros eletrocromicos em diversas aplicações (CHUA et al., 2019).

Os materiais eletrocromicos são elementos fundamentais na fabricação de vidros inteligentes capazes de modificar sua opacidade em resposta a estímulos elétricos. Diferentes classes de materiais são empregadas, sendo os mais notáveis compostos inorgânicos e polímeros orgânicos. Entre os compostos inorgânicos, destaca-se o tungstênio trióxido (WO_3), que exibe uma notável capacidade de se tornar transparente ou opaco sob a influência de campos elétricos. Sua estrutura cristalina, caracterizada por camadas de octaedros de tungstênio, facilita a inserção ou remoção de elétrons, desencadeando a variação na opacidade do material (DE OLIVEIRA; SEMAAN; PONZIO, 2015.).

Além do tungstênio trióxido, os óxidos metálicos de transição, como o nióbio pentóxido (Nb_2O_5) e o óxido de vanádio (V_2O_5), também são proeminentes na composição de vidros eletrocromicos. Esses materiais apresentam propriedades eletrocromicas notáveis devido à capacidade de alterar sua estrutura eletrônica em resposta a estímulos elétricos. A estrutura cristalina altamente ordenada desses óxidos possibilita uma transição controlada entre estados opacos e transparentes, contribuindo para a eficácia dos vidros inteligentes (ROSSEINSKY; MONK; MORTIMER, 2015).

Por outro lado, os polímeros condutores, tais como o polianilino e o polipirrol, desempenham um papel crucial na viabilização de vidros eletrocromicos flexíveis. Estes materiais orgânicos exibem uma resposta eletrocromica notável, permitindo a mudança na opacidade do vidro. Sua estrutura química conjugada e a capacidade de alternar entre estados redox conferem a esses polímeros a capacidade de se adaptar dinamicamente a estímulos elétricos, tornando-os uma escolha valiosa na produção de vidros inteligentes flexíveis (GU et al., 2022).

Além disso, é importante mencionar que a combinação de diferentes materiais eletrocromicos em sistemas multicomponentes também tem sido explorada. A sinergia entre materiais inorgânicos e polímeros orgânicos oferece uma abordagem integrada para a criação de vidros eletrocromicos com desempenho aprimorado. A seleção cuidadosa e a combinação estratégica desses materiais são cruciais para garantir uma resposta eletrocromica eficaz e controlável nos vidros inteligentes (NIU et al., 2021).

As tecnologias de controle desempenham um papel crucial na operação eficaz dos vidros inteligentes eletrocromicos. Diversos métodos e sistemas são empregados para gerenciar a opacidade desses materiais e adaptá-los às necessidades específicas dos ocupantes e às condições ambientais. Um dos métodos mais comuns de controle é o sistema de controle remoto, que permite aos usuários ajustar a opacidade dos vidros com facilidade e conveniência. Esta interface direta proporciona uma interação intuitiva com os vidros eletrocromicos, possibilitando aos ocupantes personalizar o ambiente de acordo com suas preferências (COSTA; AMORIM, 2022).

Sistemas de controle baseados em sensores também desempenham um papel fundamental na operação dos vidros eletrocromicos. Sensores de luminosidade e temperatura, por exemplo, fornecem informações valiosas sobre as condições ambientais, permitindo aos sistemas de automação predial ajustar a opacidade dos vidros de forma dinâmica. Esta abordagem reativa assegura uma resposta eficaz a mudanças nas condições de iluminação e temperatura, otimizando o conforto e a eficiência energética do espaço (NETTO, 2022).

A integração dos vidros eletrocromicos com sistemas de automação predial representa uma evolução significativa nas capacidades de controle. Através da comunicação direta com o sistema de automação, os vidros podem ser coordenados com outros elementos do ambiente construído, como sistemas de iluminação, climatização e segurança. Esta integração sinérgica possibilita uma resposta coordenada e eficaz a uma ampla gama de variáveis ambientais, contribuindo para um ambiente construído mais eficiente e adaptável (TAVARES et al., 2016).

Ademais, a aplicação de sistemas de controle programáveis e algoritmos de aprendizado de máquina oferece a possibilidade de automação avançada. Esses sistemas têm a capacidade de aprender e adaptar-se às preferências dos ocupantes ao longo do tempo, ajustando a opacidade dos vidros de maneira preditiva. Esta abordagem pró-ativa proporciona um nível elevado de personalização e eficiência operacional, melhorando significativamente o conforto e a funcionalidade do ambiente (WANG et al., 2020).

4.3.2 Aplicações e Benefícios dos Vidros Inteligentes Eletrocromicos

Os vidros inteligentes eletrocromicos emergiram como uma inovação crucial na indústria da construção civil, oferecendo uma solução avançada para aprimorar a eficiência energética e o conforto ambiental em edifícios. Ao promover a modulação automática da transmissão de luz, os vidros inteligentes eletrocromicos contribuem para a redução do consumo de energia, minimizando a necessidade de iluminação artificial e otimizando o uso de sistemas de climatização (CANNAVALE et al., 2020).

A eficiência energética e o conforto térmico são fatores cruciais na concepção de edifícios sustentáveis e habitáveis. Nesse contexto, os vidros inteligentes eletrocromicos desempenham um papel significativo ao regular a transmissão de luz

e calor nos espaços interiores. A capacidade de ajustar dinamicamente a opacidade dos vidros em resposta às condições ambientais permite uma gestão eficaz do ganho de calor solar. Isso resulta em uma redução substancial na necessidade de sistemas de climatização, contribuindo diretamente para a eficiência energética dos edifícios (SUZUKI et al., 2022).

Figura 10 - Vidro Eletrocromico na construção civil.



Fonte: <https://allaboutthatglass.wordpress.com/2015/07/24/vidro-eletrocromico-oi/>

Os vidros inteligentes eletrocromicos oferecem a vantagem de promover o aproveitamento máximo da luz natural. Ao regular o controle da quantidade de luz que entra no espaço, esses vidros minimizam a necessidade de iluminação artificial, especialmente durante o dia. Isso não apenas reduz o consumo de energia associado à iluminação, mas também cria um ambiente interno mais agradável e produtivo para os ocupantes (COSTA; AMORIM, 2021).

O impacto positivo na eficiência energética se estende ainda mais quando se considera o gerenciamento da carga térmica nos edifícios. Ao controlar a transmissão de calor através dos vidros, é possível reduzir a carga sobre os sistemas de aquecimento e resfriamento. Isso é particularmente relevante em climas com variações sazonais extremas, onde os vidros inteligentes eletrocromicos podem ser utilizados para mitigar as demandas de climatização (DA SILVA, 2020).

Além dos benefícios tangíveis em termos de eficiência energética, os vidros inteligentes eletrocromicos também contribuem para o conforto térmico dos ocupantes. A capacidade de ajustar a opacidade dos vidros em resposta às condições de iluminação e temperatura cria um ambiente interno mais adaptável e

agradável. Os ocupantes podem desfrutar de níveis ideais de iluminação e privacidade, ao mesmo tempo em que mantêm um ambiente térmico confortável (NETTO, 2022).

A privacidade é um elemento essencial na concepção de espaços habitáveis e funcionais em edifícios. Os vidros inteligentes eletrocromicos, com sua capacidade de ajustar dinamicamente a opacidade, oferecem uma solução inovadora para atender às necessidades de privacidade dos ocupantes. Ao contrário dos métodos tradicionais, que muitas vezes envolvem a utilização de cortinas ou persianas, os vidros eletrocromicos proporcionam uma abordagem dinâmica e personalizada. Esta adaptação em tempo real permite que os ocupantes controlem a visibilidade através das superfícies envidraçadas, proporcionando um ambiente que se ajusta instantaneamente às preferências individuais (CAI; LEE, 2016).

Além disso, a capacidade de ajustar a opacidade dos vidros em resposta a estímulos elétricos oferece um nível adicional de controle sobre a privacidade. Este recurso é particularmente valioso em ambientes onde a exposição externa varia ao longo do dia ou em espaços compartilhados com requisitos de privacidade variados. Os vidros eletrocromicos podem ser programados para responder a padrões específicos de utilização, garantindo uma proteção eficaz da privacidade sem comprometer a entrada de luz natural (LI et al., 2020).

A privacidade adaptativa proporcionada pelos vidros eletrocromicos também pode ter um impacto positivo na eficiência energética dos edifícios. Ao controlar a transmissão de luz e calor, esses vidros ajudam a regular a carga térmica nos espaços interiores, minimizando a necessidade de climatização excessiva. Esta sinergia entre privacidade e eficiência energética destaca a versatilidade e o potencial dos vidros eletrocromicos na concepção de ambientes construídos mais eficientes e confortáveis (WANG, 2019).

Ademais, a privacidade adaptativa oferece a oportunidade de criar espaços mais funcionais e versáteis. Em ambientes comerciais e de escritório, por exemplo, os vidros eletrocromicos podem ser utilizados para configurar áreas de trabalho flexíveis que se ajustam às necessidades específicas de colaboração e concentração. Essa capacidade de adaptação dinâmica cria um ambiente de

trabalho mais dinâmico e adaptável às demandas em constante mudança dos ocupantes (LI et al., 2020).

Os vidros eletrocromicos têm demonstrado ser uma inovação valiosa em uma variedade de setores industriais, proporcionando soluções sob medida para ambientes com requisitos particulares. No campo da saúde, esses vidros têm sido amplamente adotados em instalações hospitalares e clínicas. Ao possibilitar a regulação da privacidade e a entrada de luz natural em áreas de tratamento, os vidros eletrocromicos contribuem para a criação de espaços mais funcionais e confortáveis para pacientes e profissionais de saúde. Além disso, sua capacidade de adaptação dinâmica se alinha perfeitamente com a necessidade de flexibilidade na configuração de ambientes de saúde, proporcionando um ambiente propício para recuperação e tratamento (OLIVEIRA; SEMAAN, 2015).

No setor de transporte, os vidros inteligentes eletrocromicos estão revolucionando o *design* e a funcionalidade de veículos. Ao oferecer a capacidade de ajustar a opacidade das janelas, esses vidros melhoram a experiência dos passageiros, proporcionando controle sobre a entrada de luz e a visibilidade externa. Em aviões, trens e automóveis, essa funcionalidade é particularmente valiosa para reduzir o brilho solar excessivo, melhorando o conforto dos passageiros e reduzindo a carga sobre os sistemas de ar condicionado (TAVARES, 2015).

Na indústria, os vidros eletrocromicos desempenham um papel fundamental em ambientes de produção e manufatura. A capacidade de controlar a entrada de luz natural e regular a temperatura interna é essencial para otimizar as condições de trabalho. Em fábricas e instalações industriais, onde o controle preciso do ambiente é crítico para a produção eficiente, os vidros eletrocromicos oferecem uma solução altamente flexível e adaptável (COSTA; AMORIM, 2021).

Ademais, os vidros inteligentes eletrocromicos encontram aplicações específicas em ambientes de pesquisa e desenvolvimento. Em laboratórios e instalações de teste, onde as condições de iluminação e temperatura são fatores críticos, esses vidros fornecem um meio eficaz de controle ambiental. A capacidade de ajustar a opacidade em tempo real permite que os pesquisadores adaptem o ambiente de trabalho às necessidades específicas de suas atividades, contribuindo para uma pesquisa mais precisa e produtiva (COSTA; AMORIM, 2022).

4.4 Fotocrômico

4.4.1 Tecnologia e Funcionamento do Vidro Inteligente Fotocrômico

Os vidros inteligentes fotocrômicos são dotados de propriedades fotocrômicas que possibilitam uma mudança na opacidade em resposta à exposição à radiação eletromagnética, especialmente aos raios ultravioleta (UV). Essa capacidade é fundamentada em mecanismos moleculares intrínsecos aos materiais fotocrômicos. Um exemplo notável é a presença de moléculas orgânicas ou inorgânicas que podem sofrer uma reação química reversível quando expostas à radiação UV. Essa reação resulta na alteração da estrutura molecular desses materiais, levando à variação na absorção e transmissão de luz, e, por conseguinte, à modificação da opacidade do vidro (AL-QAHTANI et al., 2022).

A reação aos raios UV desempenha um papel crucial nos princípios fotocrômicos dos vidros inteligentes. Quando os materiais fotocrômicos são expostos à radiação UV, ocorre uma transformação nas propriedades ópticas do material, levando à sua opacificação. Esse processo é, em essência, uma resposta direta à incidência de radiação eletromagnética em uma determinada faixa de comprimento de onda. Portanto, a intensidade e a duração da exposição aos raios UV têm um impacto direto na magnitude da mudança de opacidade, proporcionando um controle preciso e ajustável sobre o estado do vidro inteligente fotocrômico (TORRES-PIERNA; RUIZ-MOLINA; ROSCINI, 2020).

A composição e estrutura molecular dos materiais fotocrômicos são elementos-chave para compreender os princípios fotocrômicos. Esses materiais são projetados para conter grupos químicos específicos que são sensíveis à radiação UV. Esses grupos podem passar por processos de isomerização, tautomérica ou de transferência de elétrons quando excitados por fótons de UV. A estrutura molecular também influencia a cinética dessas reações, determinando a rapidez com que o material responde à exposição à radiação. Assim, a formulação química e a organização molecular desses materiais desempenham um papel crucial na eficácia e na reversibilidade do processo fotocrômico em vidros inteligentes (ADAMIDIS; KONIDAKIS; STRATAKIS, 2023).

O tempo de resposta é um parâmetro crítico que define a velocidade com que um vidro inteligente fotocromico transita do estado claro para o estado opaco em resposta à exposição à luz solar. Essa característica está diretamente relacionada à eficiência e eficácia do vidro em adaptar-se dinamicamente às condições de iluminação. A maioria dos vidros fotocromicos exhibe tempos de resposta notavelmente rápidos, tipicamente variando de alguns segundos a alguns minutos. No entanto, a variação na composição química e estrutura molecular dos materiais fotocromicos pode influenciar significativamente esse tempo de resposta, sendo um aspecto essencial no desenvolvimento desses materiais (LANDARIN, 2014).

A influência da intensidade da luz na velocidade da mudança de opacidade é outro fator crucial a ser considerado. A taxa de transição entre os estados claro e opaco está diretamente correlacionada com a intensidade da luz incidente. Sob uma alta intensidade de luz solar, os vidros fotocromicos tendem a mudar de estado mais rapidamente em comparação com condições de baixa luminosidade. Esta sensibilidade à intensidade luminosa é uma característica que permite a adaptação dinâmica do vidro em tempo real, otimizando o conforto e a eficiência energética nos espaços interiores (GONÇALVES, 2015).

A durabilidade e estabilidade da propriedade fotocromica dos materiais são aspectos cruciais a serem considerados na concepção de vidros inteligentes. Fatores como exposição prolongada à luz solar, variações de temperatura e ciclos repetidos de mudança de estado podem influenciar a capacidade do material de manter suas propriedades fotocromicas ao longo do tempo. Portanto, a seleção de materiais fotocromicos e o desenvolvimento de técnicas de fabricação robustas são determinantes para garantir a durabilidade e estabilidade do vidro inteligente fotocromico, principalmente em ambientes onde a exposição à luz solar é frequente e intensa (ADACHI et al., 2016).

Estes vidros contêm nitrato de prata e nitrato de cobre(I) que, na presença de luz, reagem conforme a equação: $Ag^+ + Cu^+ \rightarrow Ag + Cu^{2+}$. Podemos concluir que nesta reação o cobre ganha elétrons, por isso sofre oxidação. Também são bastante utilizados em lentes de óculos, transformando em óculos escuros quando saem ao sol

Figura 11 - Vidro Fotocrômico em lentes de óculos.



Fonte: <https://lenscope.com.br/blog/lentes-fotocromaticas-vantagens-e-desvantagens/>

Além disso, a resistência a fatores ambientais, como umidade e poluentes atmosféricos, também desempenha um papel crítico na durabilidade do vidro fotocromico. Materiais fotocromicos bem formulados devem ser capazes de manter suas propriedades ópticas mesmo em condições ambientais adversas. Testes de envelhecimento acelerado e simulações de exposição a ambientes reais são frequentemente conduzidos para avaliar a capacidade de um material fotocromico de suportar condições desafiadoras ao longo do tempo (MENG et al., 2013).

Compreender as distinções entre vidros fotocromicos e outras variedades de vidros inteligentes, como os eletrocromicos e os de cristal líquido, é essencial para avaliar a adequação desses materiais em diversas aplicações arquitetônicas e tecnológicas. Em primeiro lugar, os vidros fotocromicos diferem dos eletrocromicos em seu princípio de funcionamento. Enquanto os fotocromicos reagem de forma autônoma à exposição à luz UV, os eletrocromicos necessitam de um estímulo elétrico para modificar sua opacidade. Por outro lado, em comparação com os vidros de cristal líquido, os fotocromicos não requerem uma corrente elétrica contínua para manter seu estado, proporcionando uma vantagem em termos de eficiência energética (TALLBERG et al., 2019).

No que tange às vantagens e desvantagens, os vidros fotocromicos apresentam atributos distintos quando comparados a outras tecnologias de vidro inteligente. Uma das principais vantagens dos vidros fotocromicos é sua capacidade de operar de forma autônoma, sem a necessidade de fontes de energia externas. Isso os torna uma escolha eficaz em aplicações onde a disponibilidade de energia elétrica é limitada ou indesejável. Ademais, sua operação baseada em luz UV permite uma resposta instantânea às condições de iluminação ambiente, garantindo uma adaptação rápida e eficaz (RENZI-HAMMOND; HAMMOND, 2016).

Em termos de custo, os vidros fotocromicos muitas vezes se destacam por sua simplicidade e menor complexidade em comparação com os eletrocromicos e os de cristal líquido. A ausência de componentes eletrônicos e sistemas de controle reduz os custos de produção e manutenção, tornando-os uma opção atraente para aplicações onde o custo é um fator crítico. No entanto, é importante notar que a eficiência e a durabilidade dos vidros fotocromicos em diferentes condições

ambientais podem variar, sendo essencial considerar o ambiente específico de aplicação (LV et al., 2018).

Por outro lado, os vidros fotocromicos podem ter limitações em termos de precisão no controle de opacidade em comparação com os vidros eletrocromicos. A capacidade de ajuste contínuo da opacidade dos eletrocromicos oferece uma flexibilidade maior em termos de *design* e funcionalidade. Além disso, em situações onde o controle de privacidade é crítico, os vidros eletrocromicos podem ser mais adequados, uma vez que permitem ajustes precisos conforme as necessidades dos ocupantes (WOLFE; GOOSSEN, 2018).

4.4.2 Aplicações e Benefícios do Vidro Inteligente Fotocromico

Os vidros inteligentes fotocromicos encontram um amplo espectro de aplicações em edifícios comerciais e residenciais, destacando-se como uma inovação essencial na busca por ambientes sustentáveis e eficientes em termos energéticos. Um dos principais usos desses materiais é na composição de fachadas de edifícios. Ao integrar vidros fotocromicos nessas estruturas, é possível controlar de forma dinâmica a entrada de luz natural, adaptando-se às condições de iluminação externa. Isso não apenas proporciona um ambiente mais confortável e produtivo para os ocupantes, mas também reduz a necessidade de iluminação artificial, contribuindo para a economia de energia (SUZUKI, 2022).

Figura 12 - Samsung SDS Global Headquarters, Seul, Coreia do Sul.

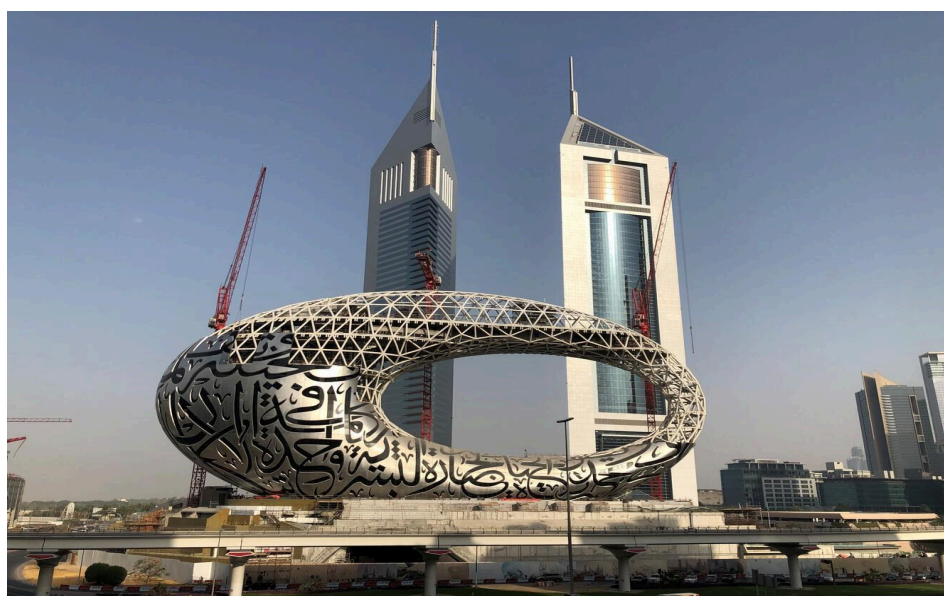


Fonte: <https://www.kedglobal.com/real-estate/newsView/ked202306190020>

Além do controle de iluminação, os vidros fotocromáticos também têm um impacto significativo na eficiência energética de edifícios comerciais e residenciais. A capacidade desses materiais de ajustar sua opacidade em resposta à exposição solar direta influencia diretamente a carga térmica nos interiores. Com a redução do ganho de calor proveniente da radiação solar, os sistemas de climatização podem operar de forma mais eficiente, resultando em uma menor demanda de energia para manter temperaturas internas confortáveis. Essa eficiência energética se traduz em benefícios tanto para os proprietários dos edifícios quanto para o meio ambiente, ao reduzir as emissões de gases de efeito estufa associadas ao consumo de energia (COSTA; AMORIM, 2021).

A versatilidade dos vidros fotocromáticos também se destaca na sua capacidade de se adaptar a diferentes estilos arquitetônicos. Esses materiais podem ser integrados em uma variedade de *designs* e configurações de edifícios, permitindo uma ampla gama de aplicações estéticas. Seja em edifícios modernos e minimalistas, ou em estruturas mais tradicionais e clássicas, os vidros fotocromáticos oferecem uma solução flexível que se harmoniza com a estética arquitetônica desejada. Essa adaptabilidade é crucial para a integração bem-sucedida desses materiais em uma variedade de contextos urbanos e paisagísticos (PORTO, 2019).

Figura 13 - Museum of the Future, Dubai, Emirados Árabes Unidos.



Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/983953/superando-desafios-projetuais-com-tecnologia-museu-d-o-futuro-em-dubai/62b326222c50db016721f0d8-superando-desafios-projetuais-com-tecnologia-muse>

A aplicação dos vidros inteligentes fotocromicos em veículos e transporte representa um avanço significativo em termos de conforto e segurança dos passageiros. A integração desses materiais inovadores nas janelas de automóveis tem um impacto direto no bem-estar dos ocupantes. Ao ajustar dinamicamente a opacidade em resposta à variação das condições de iluminação, os vidros fotocromicos proporcionam um ambiente interno mais agradável e livre de desconfortos causados pelo excesso de luminosidade. Essa adaptação automática contribui para uma experiência de viagem mais tranquila e agradável (ASKELAND; WRIGHT, 2023).

Além do aumento do conforto, os vidros fotocromicos também oferecem benefícios tangíveis em termos de segurança no trânsito. A redução do ofuscamento causado pelo sol é particularmente notável. Ao minimizar os efeitos prejudiciais da luz solar direta nos olhos dos condutores, esses vidros ajudam a manter uma visão clara e sem obstruções da estrada, reduzindo os riscos de acidentes causados por condições de visibilidade comprometida. Dessa forma, os vidros fotocromicos contribuem para a segurança ativa dos veículos, melhorando a capacidade dos motoristas de reagir de maneira eficaz a situações de tráfego desafiadoras (NALIN et al., 2016).

Além de proporcionar conforto e segurança, a aplicação de vidros inteligentes fotocromicos em veículos também tem um potencial significativo para aprimorar a eficiência energética dos automóveis. Ao controlar de forma dinâmica a entrada de luz, esses vidros podem reduzir a necessidade de utilização de sistemas de climatização, que muitas vezes representam uma parcela significativa do consumo de energia em veículos. Com a minimização do calor solar indesejado, a carga sobre o sistema de ar condicionado é reduzida, resultando em uma maior eficiência operacional e, conseqüentemente, em uma menor demanda por combustível ou energia elétrica (LOI, 2016).

Os vidros inteligentes fotocromicos têm sido objeto de avanços significativos na última década, impulsionados por pesquisas e inovações tecnológicas. Novos materiais fotocromicos estão sendo desenvolvidos para oferecer tempos de resposta

mais rápidos, maior durabilidade e uma gama mais ampla de opacidade ajustável. Além disso, a integração de sensores e sistemas de controle mais sofisticados tem proporcionado uma resposta mais precisa às condições de iluminação, aprimorando ainda mais o desempenho desses materiais em ambientes variados (BRZEZICKI, 2021).

As perspectivas de crescimento para os vidros fotocromicos são promissoras, com uma expansão esperada em diversos setores. Além do uso tradicional em edifícios comerciais e residenciais, espera-se uma adoção mais ampla em setores como transporte, saúde e indústria. A aplicação desses materiais em veículos, hospitais e ambientes industriais pode trazer benefícios significativos em termos de conforto, segurança e eficiência energética (WANG; LI, 2018).

No entanto, o crescimento na utilização de vidros fotocromicos também levanta considerações ambientais e regulatórias. A fabricação desses materiais pode envolver processos químicos e de produção que requerem gestão adequada para minimizar impactos ambientais. Cabe ressaltar que, a eventual substituição ou reciclagem desses vidros no final de sua vida útil é uma consideração importante para a sustentabilidade do ciclo de vida do produto. Regulamentações e padrões de segurança também devem ser estabelecidos para garantir o uso responsável e seguro desses materiais em uma ampla gama de aplicações (BRZEZICKI, 2021).

Outra tendência futura importante é a integração dos vidros fotocromicos em sistemas de automação predial e redes inteligentes. A capacidade de controlar a opacidade dos vidros em resposta a condições de iluminação e temperatura pode ser otimizada por meio de algoritmos de controle avançados. Isso permitirá uma gestão mais eficiente e adaptável dos recursos energéticos em edifícios, contribuindo para um desempenho ambiental mais sustentável (WANG; LI, 2018).

Os algoritmos de controle avançado ajustam dinamicamente a quantidade de luz ambiente, adaptando-se aos diferentes períodos do ano e horários do dia. Isso assegura que o ambiente mantenha uma iluminação constante.

4.5 Vidros Fotovoltaicos Integrados

4.5.1 Integração de Tecnologia Fotovoltaica em Vidros Inteligentes

A tecnologia fotovoltaica integrada em vidros inteligentes representa uma inovação significativa no campo da geração de energia a partir da luz solar. Esses vidros são concebidos para além de suas funções tradicionais, como proteção e isolamento térmico, incorporando células fotovoltaicas que convertem a energia solar em eletricidade. Essa integração permite que as superfícies de vidro atuem como geradores de energia distribuída, oferecendo um potencial considerável para a produção de eletricidade de forma limpa e sustentável (DE OLIVEIRA; SEMAAN; PONZIO, 2015).

Figura 14 - Vidro Fotovoltaico.



Fonte: <https://archglassbrasil.com.br/artigos/tipos-de-vidro/vidro-fotovoltaico-o-que-e-e-como-funciona/>

Em termos de eficiência da conversão fotovoltaica, os vidros inteligentes fotovoltaicos demonstram uma notável capacidade de transformar a energia solar em eletricidade. A eficiência é comparável, e em alguns casos até supera, a de células fotovoltaicas convencionais. Enquanto as células fotovoltaicas tradicionais são muitas vezes instaladas em painéis separados, os vidros fotovoltaicos oferecem uma integração direta nas superfícies do edifício, aproveitando áreas já destinadas à

envidraçamento. Esta característica permite um uso mais eficiente do espaço disponível e uma estética mais integrada na arquitetura (BARROS, 2017).

Recentemente, avanços significativos têm sido alcançados na melhoria da eficiência de conversão em vidros inteligentes com tecnologia fotovoltaica. Pesquisas e desenvolvimentos na formulação de materiais semicondutores e no *design* das células fotovoltaicas têm resultando em ganhos substanciais de eficiência. A introdução de materiais semicondutores de última geração e técnicas de encapsulamento inovadoras tem contribuído para a maximização da absorção de luz solar e a minimização de perdas de conversão. Além disso, abordagens avançadas de engenharia têm permitido uma melhor adaptação dos vidros fotovoltaicos a diferentes condições de iluminação e orientações, otimizando ainda mais a eficiência da conversão fotovoltaica (DE OLIVEIRA; SEMAAN; PONZIO, 2015).

A integração da tecnologia fotovoltaica em vidros inteligentes não apenas impulsiona a eficiência energética dos edifícios, mas também oferece oportunidades para um *design* arquitetônico inovador e esteticamente atraente. A capacidade de incorporar elementos fotovoltaicos de forma harmoniosa e integrada na estrutura arquitetônica amplia as possibilidades de *design*. Essa integração criativa permite que os vidros fotovoltaicos se tornem parte essencial do conjunto global de um edifício, ao invés de meros componentes funcionais (FERREIRA; MOREIRA; ANDRADE, 2023).

Figura 15 - One Central Park, Sydney, Austrália.



Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/758761/one-central-park-ateliers-jean-nouvel>

A transparência e coloração dos vidros inteligentes fotovoltaicos são elementos críticos no contexto do *design* e da estética. A gama de opções de transparência varia desde vidros completamente transparentes até opções mais difusas, permitindo que os arquitetos e *designers* personalizem o nível de privacidade, iluminação natural e sombreamento de acordo com as necessidades do espaço. Além disso, a coloração dos vidros pode ser ajustada para criar ambientes internos com uma tonalidade específica de iluminação, contribuindo para a atmosfera desejada no espaço (ANDRADE, 2022).

Estudos de caso exemplificam de forma tangível como a integração bem-sucedida de vidros fotovoltaicos pode transformar projetos arquitetônicos. Edifícios emblemáticos em todo o mundo demonstram como os vidros fotovoltaicos podem ser utilizados de maneiras inovadoras e esteticamente atraentes. Exemplos incluem fachadas de edifícios comerciais que incorporam padrões geométricos de

vidros fotovoltaicos, proporcionando não apenas eficiência energética, mas também uma expressão artística distintiva (SILVA, 2016).

A possibilidade de moldar os vidros fotovoltaicos de acordo com os requisitos de *design* oferece um potencial criativo inexplorado. Estes vidros podem ser adaptados para integrar padrões, logotipos ou gráficos personalizados diretamente na superfície, criando um elemento de identidade visual único para o edifício. A flexibilidade de *design* dos vidros fotovoltaicos abre espaço para a inovação na arquitetura, permitindo a criação de estruturas verdadeiramente distintas e icônicas (ANDRADE, 2022).

A geração distribuída de energia por meio de vidros fotovoltaicos representa um potencial significativo para a produção descentralizada de eletricidade em ambientes urbanos e comerciais. Ao aproveitar as superfícies já destinadas ao envidraçamento, esses vidros oferecem uma solução inovadora para a integração de energia solar em edifícios. Em áreas urbanas densamente povoadas, onde o espaço para instalações solares convencionais é limitado, os vidros fotovoltaicos apresentam uma oportunidade valiosa para aproveitar a energia solar de forma eficiente e sustentável (ZHOU et al., 2015).

A implementação de geração distribuída por meio de vidros fotovoltaicos traz consigo uma série de benefícios substanciais para os edifícios e as comunidades em que estão localizados. Primeiramente, ela reduz a demanda por eletricidade da rede elétrica, aliviando a pressão sobre a infraestrutura elétrica centralizada. Isso resulta em uma menor necessidade de expansões dispendiosas da rede e contribui para a estabilidade do sistema elétrico como um todo. A geração distribuída promove a resiliência energética ao oferecer uma fonte de energia localizada, menos suscetível a interrupções na rede (SORGATO.; SCHNEIDER; RÜTHER, 2018).

A integração de sistemas de armazenamento de energia em conjunto com vidros fotovoltaicos amplia a eficiência e a utilidade dessa tecnologia. Ao capturar e armazenar o excesso de energia gerada durante os períodos de alta insolação, os sistemas de armazenamento permitem o uso posterior da eletricidade, mesmo quando as condições de geração solar são menos favoráveis. Isso suaviza a variabilidade da geração solar e aumenta a confiabilidade do suprimento de energia proveniente dos vidros fotovoltaicos. Ademais, essa capacidade de armazenamento

pode ser essencial em situações de emergência ou falhas no fornecimento de energia da rede (ZHOU et al., 2015).

No entanto, a integração eficaz de sistemas de armazenamento de energia com vidros fotovoltaicos também requer uma gestão cuidadosa do ciclo de carga e descarga para otimizar a eficiência do sistema como um todo. Considerações sobre a capacidade de armazenamento, a tecnologia de bateria utilizada e os métodos de controle de carga são cruciais para maximizar os benefícios dessa combinação (SORGATO.; SCHNEIDER; RÜTHER, 2018).

4.5.2 Sustentabilidade e Eficiência Energética em Edifícios com Vidros Fotovoltaicos

Certificações e padrões ambientais desempenham um papel crucial na avaliação e reconhecimento da sustentabilidade de edifícios. No contexto da tecnologia fotovoltaica integrada em vidros, diversas certificações e normas foram estabelecidas para avaliar o desempenho ecológico e energético dessas construções inovadoras. Um exemplo notável é a certificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), um sistema internacionalmente reconhecido que avalia o impacto ambiental e a eficiência energética de edifícios. O uso de vidros fotovoltaicos pode ter um impacto significativo na obtenção destas certificações, demonstrando um compromisso palpável com a sustentabilidade (ALDOMONTE; SAADOUNI; SCHIAVON, 2016).

O LEED, em particular, atribui pontos para diversas categorias de eficiência e práticas sustentáveis, incluindo o uso de energias renováveis e a eficiência energética. A incorporação de vidros fotovoltaicos em um edifício pode resultar em uma pontuação mais alta nesses critérios, impulsionando a classificação geral do edifício em termos de sustentabilidade. Isso não apenas reflete positivamente na reputação ambiental do edifício, mas também pode influenciar positivamente as decisões de locação e investimento, tornando-se um fator de diferenciação no mercado imobiliário (SUZER, 2019).

Numerosos edifícios sustentáveis exemplificam a integração bem-sucedida de vidros fotovoltaicos em sua concepção. O One Angel Square em Manchester, Reino Unido, é um exemplo notável. Esse edifício, sede da Cooperativa de Alimentos e

Agricultores do Reino Unido, incorpora uma fachada extensiva de vidros fotovoltaicos que não apenas fornece energia para o edifício, mas também otimiza a entrada de luz natural. A combinação desses elementos resultou em uma certificação BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) "Outstanding", indicando o mais alto nível de desempenho ambiental (ALTOMONTE; SAADOUNI; SCHIAVON, 2016).

Figura 16 - One Angel Square, Manchester.



Fonte: <https://www.archdaily.com/337430/1-angel-square-3d-reid/512e54a2b3fc4b2d6a000276-1-angel-square-3d-reid-photo>

Além do LEED e do BREEAM, outras normas e certificações nacionais e internacionais, como o WELL Building Standard e o Green Star na Austrália, também levam em consideração a integração de tecnologia fotovoltaica em vidros na avaliação de desempenho sustentável de edifícios. Essas certificações destacam o papel crítico que os vidros fotovoltaicos desempenham na promoção da eficiência energética e na redução do impacto ambiental dos edifícios (SUZER, 2019).

A incorporação de vidros fotovoltaicos em edifícios oferece uma série de benefícios econômicos e ambientais substanciais. Em termos econômicos, a

geração de energia localizada reduz a dependência da rede elétrica externa, resultando em uma diminuição significativa nos custos operacionais associados à compra de eletricidade. Além disso, em muitos casos, a energia excedente gerada pelos vidros fotovoltaicos pode ser injetada de volta na rede elétrica, gerando créditos ou receita para o proprietário do edifício. Esses benefícios econômicos tangíveis proporcionam um retorno do investimento atraente para os proprietários de edifícios que optam por integrar vidros fotovoltaicos em sua estrutura (BERTICELLI et al., 2019).

Do ponto de vista ambiental, a tecnologia fotovoltaica em vidros desempenha um papel significativo na redução das emissões de carbono e em outros impactos ambientais positivos. Ao gerar eletricidade a partir de uma fonte renovável e limpa, os vidros fotovoltaicos ajudam a mitigar a emissão de gases de efeito estufa associados à geração de eletricidade a partir de fontes fósseis. A geração localizada de energia reduz as perdas de transmissão e distribuição que ocorrem na rede elétrica, promovendo uma utilização mais eficiente dos recursos energéticos disponíveis (COELHO; SERRA, 2018).

Estudos de caso em todo o mundo demonstram os benefícios econômicos e ambientais alcançados por edifícios que incorporam vidros fotovoltaicos. Um exemplo notável é o The Edge em Amsterdã, Países Baixos, que ostenta uma fachada extensiva de vidros fotovoltaicos. Este edifício de escritórios altamente sustentável não só produz sua própria eletricidade, mas também gera excedentes que são direcionados de volta para a rede. Como resultado, o edifício atingiu níveis impressionantes de eficiência energética e reduziu significativamente suas emissões de carbono (BERTICELLI et al., 2019).

Figura 17 - The Edge, Amsterdam.



Fonte: <https://www.archdaily.com/785967/the-edge-plp-architecture/57181d2ae58ecef70000008-the-edge-plp-architecture-photo>

Além disso, os vidros fotovoltaicos têm um impacto duradouro na resiliência ambiental e econômica dos edifícios. A redução dos custos operacionais ao longo do tempo, juntamente com a potencial geração de receita por meio da venda de energia excedente, contribui para a estabilidade financeira dos proprietários de edifícios. Ao mesmo tempo, a contribuição para a redução das emissões de carbono e outros impactos ambientais positivos faz dos edifícios com vidros fotovoltaicos uma escolha sustentável que se alinha com os objetivos globais de mitigação das mudanças climáticas (COELHO; SERRA, 2018).

A integração bem-sucedida de vidros fotovoltaicos em edifícios exige uma consideração cuidadosa de diversos desafios técnicos. Um dos principais desafios é a orientação do edifício em relação ao sol. A eficiência da geração de energia solar depende diretamente da exposição direta à luz solar. Portanto, edifícios com orientações menos favoráveis podem experimentar uma redução na eficiência de geração. Ademais, a presença de sombreamento devido a estruturas vizinhas ou elementos arquitetônicos pode impactar significativamente a produção de energia dos vidros fotovoltaicos (FARRELL et al., 2020).

Condições ambientais específicas também devem ser levadas em conta ao implementar vidros fotovoltaicos. Regiões com elevados índices de nebulosidade ou com longos períodos de chuva podem experimentar uma redução na eficiência de geração. A exposição a elementos ambientais, como chuva, vento e poluentes atmosféricos, pode afetar a durabilidade e a eficiência dos vidros fotovoltaicos ao longo do tempo. Portanto, é crucial realizar uma avaliação cuidadosa do ambiente em que o edifício está situado (JOSEPH; POGREBNAYA; KICHONGE, 2019).

Para otimizar a eficiência energética e a produção de energia em edifícios com vidros fotovoltaicos, diversas estratégias podem ser empregadas. A utilização de sistemas de rastreamento solar automatizado pode ajudar a maximizar a exposição aos raios solares, ajustando continuamente a posição dos vidros para acompanhar o movimento do sol ao longo do dia. Além disso, a combinação de vidros fotovoltaicos com técnicas de eficiência energética, como isolamento avançado e sistemas de ventilação eficiente, pode resultar em um desempenho global mais sustentável do edifício (FARRELL et al., 2020).

A implementação de sistemas de armazenamento de energia também pode ser uma estratégia eficaz para lidar com a variabilidade na geração de energia dos vidros fotovoltaicos. Ao armazenar o excesso de energia gerada durante os períodos de alta insolação, é possível utilizar essa energia em momentos em que a geração é menor. Isso ajuda a garantir um fornecimento contínuo de energia e aumenta a independência do edifício em relação à rede elétrica (JOSEPH; POGREBNAYA; KICHONGE, 2019).

4.6 Sistemas de Controle e Automação em Vidros Inteligentes

4.6.1 Tecnologias de Controle em Vidros Inteligentes

Os sensores desempenham um papel crucial no funcionamento eficaz dos vidros inteligentes, permitindo uma resposta dinâmica às condições ambientais e às necessidades dos ocupantes. Um tipo fundamental de sensor empregado é o sensor de luz e luminosidade, que monitora a intensidade da luz incidente sobre o vidro. Ao captar as variações na luminosidade ambiente, os vidros inteligentes podem ajustar automaticamente sua opacidade para otimizar a entrada de luz natural. Esse mecanismo permite a maximização do aproveitamento da luz do dia, contribuindo para a eficiência energética do edifício e o conforto visual dos ocupantes (ZHOU et al., 2020).

Além dos sensores de luz, os vidros inteligentes frequentemente são equipados com sensores de temperatura. Estes dispositivos monitoram a variação de temperatura no ambiente, fornecendo informações essenciais para a otimização do conforto térmico. Com base nos dados coletados, os vidros inteligentes podem ajustar suas propriedades para regular a transmissão de calor, contribuindo para a manutenção de um ambiente interno agradável e eficiente em termos energéticos (LIU et al., 2020).

Os sensores de presença também desempenham um papel significativo no controle dos vidros inteligentes. Ao detectar a presença de ocupantes em um espaço, esses sensores acionam a ativação ou desativação dos ajustes do vidro. Essa funcionalidade é particularmente valiosa em ambientes de escritório e espaços comerciais, onde a ocupação dos espaços pode variar ao longo do dia. A ativação baseada na ocupação assegura que os vidros estejam configurados de forma a atender às necessidades imediatas dos ocupantes, equilibrando eficiência energética com conforto individual (ZHOU et al., 2020).

A integração coordenada desses sensores e dispositivos de controle cria um sistema dinâmico e responsivo de gestão da luminosidade e do conforto térmico em edifícios. Esses componentes sensoriais permitem uma operação autônoma dos vidros inteligentes, reduzindo a necessidade de intervenção manual. Além disso, ao adaptar-se em tempo real às condições do ambiente, os vidros inteligentes

contribuem para um ambiente de vida e trabalho mais confortável, eficiente e sustentável (LIU et al., 2020).

Os sistemas de controle inteligente constituem a espinha dorsal da operação eficiente dos vidros inteligentes, possibilitando uma resposta precisa e dinâmica às condições ambientais. Estes sistemas frequentemente utilizam microcontroladores e microprocessadores para gerenciar e coordenar as operações dos vidros. Os microcontroladores fornecem uma capacidade computacional dedicada para a tomada de decisões em tempo real, permitindo ajustes contínuos na opacidade dos vidros. Paralelamente, os microprocessadores, com sua capacidade de processamento mais ampla, são empregados para tarefas mais complexas, como a integração de dados de múltiplos sensores e a adaptação das configurações dos vidros com base em algoritmos predeterminados (KHANDELWAL; SCHENNING, 2017).

A tecnologia de rede desempenha um papel crucial na integração dos vidros inteligentes em sistemas de automação predial mais amplos. Por meio de protocolos de comunicação avançados, os vidros podem interagir com outros componentes do sistema predial, como sistemas de iluminação, climatização e segurança. A capacidade de compartilhar informações e comandos dentro do contexto de um sistema maior permite uma coordenação eficaz para otimizar o ambiente do edifício. Ademais, a integração em rede facilita a monitorização remota e a gestão centralizada dos vidros inteligentes (WANG; RUNNERSTROM; MILLIRON, 2016).

Algoritmos de aprendizado de máquina têm se destacado como uma ferramenta poderosa para a adaptação dinâmica dos vidros inteligentes. Ao utilizar algoritmos de aprendizado de máquina, os vidros podem analisar dados históricos e em tempo real para entender os padrões de uso e as preferências dos ocupantes. Com base nesses insights, os vidros podem ajustar automaticamente suas configurações para atender às necessidades específicas do ambiente. Isso resulta em um ambiente mais personalizado e eficiente em termos energéticos, pois os vidros aprendem a responder de maneira otimizada a diferentes condições e cenários (KHANDELWAL; SCHENNING, 2017).

Esses sistemas de controle inteligente proporcionam uma operação eficaz e responsiva dos vidros inteligentes, permitindo a adaptação contínua às

necessidades dinâmicas do ambiente. Ao empregar microcontroladores e microprocessadores, esses sistemas têm a capacidade de tomar decisões em tempo real, garantindo um ajuste preciso da opacidade dos vidros. A integração em redes prediais mais amplas, por sua vez, proporciona uma coordenação eficiente com outros sistemas, maximizando a eficiência global do edifício. Por fim, a implementação de algoritmos de aprendizado de máquina oferece uma abordagem inovadora para a personalização e otimização dos ajustes dos vidros inteligentes, resultando em um ambiente mais confortável, eficiente e sustentável (WANG; RUNNERSTROM; MILLIRON, 2016).

A interface do usuário desempenha um papel essencial na interação dos ocupantes com os vidros inteligentes. Painéis de controle intuitivos fornecem uma maneira direta e acessível para os ocupantes ajustarem as configurações dos vidros de acordo com suas preferências. Estes painéis são projetados com uma abordagem ergonômica, garantindo que as operações sejam intuitivas e de fácil compreensão. Isso permite que os ocupantes tenham um controle imediato sobre o ambiente visual e térmico do espaço, promovendo um maior conforto e satisfação (KING; PERRY, 2017).

Além dos painéis de controle, aplicativos móveis têm se tornado uma ferramenta poderosa para o controle remoto e monitoramento dos vidros inteligentes. Com a crescente ubiquidade dos dispositivos móveis, os ocupantes têm a capacidade de ajustar as configurações dos vidros a partir de seus smartphones ou tablets. Isso oferece uma conveniência adicional, permitindo que os ajustes sejam feitos de forma remota, mesmo quando os ocupantes estão fora do local. Além disso, os aplicativos móveis frequentemente oferecem funcionalidades de monitoramento em tempo real, permitindo que os ocupantes visualizem as condições atuais e façam ajustes conforme necessário (KHALIG et al., 2015).

A integração com assistentes de voz representa uma evolução significativa na acessibilidade e usabilidade dos vidros inteligentes. Por meio de comandos de voz simples e naturais, os ocupantes podem controlar os ajustes dos vidros sem a necessidade de tocar em qualquer interface física. Isso não apenas proporciona uma experiência mais intuitiva, mas também pode ser particularmente benéfico para pessoas com necessidades especiais de mobilidade ou visão. A capacidade de

interagir com os vidros por meio de comandos de voz demonstra um avanço significativo na tornar os espaços mais inclusivos e acessíveis para todos (KING; PERRY, 2017).

Essas interfaces do usuário e opções de controle remoto contribuem significativamente para a usabilidade e praticidade dos vidros inteligentes. Ao oferecer uma variedade de opções intuitivas e acessíveis para ajustes, os ocupantes têm um maior controle sobre o ambiente do edifício. Isso não apenas promove o conforto e a satisfação dos ocupantes, mas também pode levar a uma maior eficiência energética ao otimizar a utilização da luz natural e o gerenciamento térmico (KHALIG et al., 2015).

4.6.2 Integração com Sistemas de Automação Predial

A integração dos vidros inteligentes com sistemas de HVAC é fundamental para a otimização do consumo de energia em edifícios. Essa coordenação permite que os vidros ajustem sua opacidade em resposta às condições térmicas do ambiente. Quando o sistema de HVAC está em operação, os vidros podem modular a entrada de luz e calor, reduzindo a necessidade de uso de aquecimento ou refrigeração artificial. Essa sinergia entre vidros inteligentes e HVAC promove uma eficiência energética mais significativa, resultando em economias substanciais de energia (DE OLIVEIRA; SEMAAN; PONZIO, 2015).

Além de otimizar o consumo de energia, a integração com sistemas de HVAC permite que os vidros inteligentes respondam de forma proativa a eventos climáticos e variações sazonais. Por exemplo, em dias de calor intenso, os vidros podem escurecer para reduzir a entrada de calor, aliviando a carga sobre o sistema de ar condicionado. Da mesma forma, durante os meses mais frios, os vidros podem maximizar a entrada de luz solar para aproveitar o calor natural, diminuindo a necessidade de aquecimento. Essa capacidade de adaptação às condições climáticas em tempo real contribui para um ambiente interno mais confortável e eficiente (RIBEIRO, 2016).

A integração com HVAC também permite que os vidros inteligentes levem em conta a presença e preferências dos ocupantes. Sensores de ocupação podem fornecer informações sobre a presença de pessoas em um espaço, permitindo que

os vidros ajustem suas configurações de acordo. Se um ambiente estiver ocupado, os vidros podem se adaptar para otimizar o conforto térmico e a qualidade da luz natural. Isso não apenas aprimora a experiência dos ocupantes, mas também contribui para uma gestão mais eficaz dos recursos energéticos do edifício (DE OLIVEIRA; SEMAAN; PONZIO, 2015).

Essa integração avançada entre vidros inteligentes e sistemas HVAC exemplifica uma abordagem moderna e eficaz para a gestão térmica e energética em edifícios. Ao coordenar a operação desses sistemas, é possível alcançar um equilíbrio ótimo entre a entrada de luz natural, a regulação térmica e o uso eficiente de recursos energéticos. Essa eficiência pode resultar em reduções significativas nos custos de energia e nas emissões de carbono associadas à climatização de edifícios (RIBEIRO, 2016).

A sincronização dos vidros inteligentes com os sistemas de iluminação do ambiente é um aspecto crucial para otimizar a entrada de luz natural nos espaços interiores. Quando a luz natural é abundante, os vidros podem ajustar sua opacidade para permitir uma maior penetração da luz, reduzindo assim a necessidade de iluminação artificial. Por outro lado, em momentos de menor luminosidade natural, os vidros podem ajustar-se para maximizar a eficiência da iluminação artificial. Esta sincronização contribui significativamente para a eficiência energética do edifício, reduzindo a dependência de fontes de luz elétrica (ASHOK et al., 2016).

Além disso, a coordenação entre os vidros inteligentes e os sistemas de controle de sombreamento é essencial para evitar o ofuscamento excessivo e minimizar o ganho de calor solar indesejado. Em situações em que a luz solar direta incide sobre os vidros, estes podem escurecer ou adotar uma opacidade adequada para reduzir o brilho, sem comprometer a qualidade da luz interior. Isto não apenas proporciona conforto visual aos ocupantes, mas também contribui para a eficiência térmica do edifício, evitando o superaquecimento causado pela radiação solar excessiva (RASHID et al., 2014).

A capacidade de resposta dinâmica dos vidros inteligentes às mudanças na luz ambiente é um recurso inestimável para a adaptação contínua das condições de iluminação. Quando a intensidade da luz natural varia ao longo do dia devido a fatores como a posição do sol e as condições meteorológicas, os vidros podem

ajustar-se em tempo real para manter um ambiente interno equilibrado e bem iluminado. Esta resposta dinâmica assegura um nível consistente de luz natural, promovendo um ambiente de trabalho ou habitação mais produtivo e agradável (ASHOK et al., 2016).

A sincronização entre vidros inteligentes e sistemas de iluminação e controle de sombreamento é um elemento-chave na busca pela eficiência energética e conforto ambiental em edifícios. Ao permitir a entrada otimizada de luz natural, evitar o ofuscamento excessivo e responder dinamicamente às mudanças nas condições de luz ambiente, os vidros inteligentes demonstram um papel fundamental na criação de ambientes internos funcionais e agradáveis (RASHID et al., 2014).

A integração dos vidros inteligentes com sistemas de segurança é uma estratégia crucial para a proteção dos ocupantes e do espaço. Em situações de emergência ou de alto risco, os vidros podem ser programados para ativar um modo de segurança que proporciona opacidade máxima. Isso impede a visibilidade para o interior do edifício, protegendo a privacidade e a segurança dos ocupantes. Esta funcionalidade é particularmente valiosa em situações de intrusão, permitindo que os vidros atuem como uma camada adicional de segurança (ISLAM; AHMAD, 2019).

Cabe ressaltar que a capacidade de resposta dos vidros inteligentes a alarmes e eventos de segurança é um recurso fundamental para a proteção dos ocupantes. Em caso de detecção de um alarme, como um incêndio ou uma intrusão, os vidros podem reagir instantaneamente para proporcionar opacidade total, dificultando a visão do interior do edifício a partir do exterior. Esta resposta rápida é crucial para criar uma camada adicional de segurança e proteção em situações de emergência (XU et al., 2017).

A integração dos vidros inteligentes com câmeras e sensores de vigilância é uma estratégia adicional para reforçar a segurança do ambiente. Os vidros podem ser sincronizados com os sistemas de vigilância existentes, permitindo uma visualização clara e ininterrupta das áreas internas e externas do edifício. Em situações de alto risco, os vidros podem ser configurados para proporcionar opacidade máxima, protegendo a privacidade dos ocupantes e mantendo uma barreira visual contra potenciais ameaças externas (ISLAM; AHMAD, 2019).

Esta integração avançada com sistemas de segurança e monitoramento demonstra uma abordagem holística e inovadora para a segurança em edifícios. Ao permitir a ativação de modos de segurança, responder a alarmes e integrar-se a sistemas de vigilância, os vidros inteligentes se tornam uma parte essencial do sistema de segurança global do edifício (XU et al., 2017).

4.7 Aspectos Econômicos e Sustentabilidade na Utilização de Vidros Inteligentes

4.7.1 Impacto Econômico na Utilização de Vidros Inteligentes

A implementação de vidros inteligentes proporciona uma notável eficiência energética nos edifícios. Ao adaptar-se dinamicamente à intensidade da luz solar e às condições climáticas externas, os vidros inteligentes otimizam a entrada de luz natural. Isso resulta em uma redução significativa na necessidade de utilização de sistemas de climatização, especialmente durante os períodos de alta exposição solar. A eficiência energética induzida pelos vidros inteligentes tem o potencial de diminuir substancialmente os custos associados à operação de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC), contribuindo para a economia operacional do edifício (CHAVES, 2020).

A capacidade dos vidros inteligentes de fornecer iluminação natural é um fator crucial na redução dos custos operacionais de um edifício. Ao ajustar sua opacidade em resposta à incidência da luz solar, os vidros minimizam a necessidade de iluminação artificial em espaços internos. Isso se traduz em uma diminuição significativa na demanda de eletricidade para iluminação, reduzindo assim os custos associados ao consumo de energia elétrica. Além disso, a promoção da iluminação natural também pode melhorar o conforto visual e a produtividade dos ocupantes, proporcionando benefícios adicionais para a operação do edifício (SUZUKI, 2022).

A durabilidade e a resistência dos vidros inteligentes têm um impacto direto nos custos de manutenção a longo prazo. Estes vidros são projetados para resistir a condições ambientais adversas, minimizando a necessidade de reparos frequentes ou substituições. A redução da frequência de intervenções de manutenção não apenas diminui os custos associados, mas também contribui para a eficiência operacional do edifício, assegurando a continuidade das operações sem

interrupções prolongadas. Portanto, a escolha de vidros inteligentes pode resultar em economias substanciais ao longo da vida útil do edifício(CHAVES, 2020).

A proteção proporcionada pelos vidros inteligentes contra os efeitos adversos do ambiente externo, como variações climáticas extremas, poluentes atmosféricos e raios UV, também contribui para a redução dos custos operacionais. Ao preservar a integridade dos elementos internos do edifício, como mobiliário e acabamentos, os vidros inteligentes ajudam a prolongar a vida útil desses componentes, reduzindo assim a necessidade de substituições ou reparos dispendiosos (SUZUKI, 2022).

Além dos benefícios diretos na eficiência energética e manutenção, os vidros inteligentes podem também influenciar os custos operacionais ao criar um ambiente mais agradável e confortável para os ocupantes. O aumento do conforto térmico e visual pode resultar em uma melhoria da satisfação e produtividade dos ocupantes, fatores que, por sua vez, têm o potencial de impactar positivamente a eficiência e a eficácia das operações realizadas no edifício, traduzindo-se em economias adicionais a longo prazo (CHAVES, 2020).

4.7.2 Sustentabilidade na Utilização de Vidros Inteligentes

A introdução de vidros inteligentes em edifícios desempenha um papel crucial na promoção da eficiência energética. Essa tecnologia inovadora tem o potencial de reduzir significativamente a necessidade de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC) em um edifício. Ao permitir o controle dinâmico da entrada de luz e calor, os vidros inteligentes otimizam as condições ambientais internas, minimizando a dependência de sistemas de climatização tradicionais. Dessa forma, contribuem para a redução do consumo energético e para a eficiência operacional dos edifícios (OLIVEIRA; SEMAAN; PONZIO, 2015).

A incorporação de vidros inteligentes em edifícios desempenha um papel crucial na redução das emissões de gases de efeito estufa. Ao reduzir o consumo de energia associado ao HVAC, essa tecnologia contribui diretamente para a diminuição da pegada de carbono dos edifícios. A utilização eficaz de vidros inteligentes permite uma gestão mais eficiente dos recursos energéticos, resultando em um ambiente construído mais sustentável e alinhado com as metas de redução de emissões

estabelecidas em acordos internacionais de combate às mudanças climáticas (SUZUKI, 2022).

Os edifícios que incorporam tecnologias avançadas, como os vidros inteligentes, têm a possibilidade de obter certificações sustentáveis reconhecidas internacionalmente. Programas de certificação, como o LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) e o BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), valorizam a eficiência energética e a adoção de soluções inovadoras na construção civil. A presença de vidros inteligentes pode ser um fator determinante na pontuação dessas certificações, demonstrando o compromisso do edifício com práticas construtivas ambientalmente responsáveis (OLIVEIRA; SEMAAN; PONZIO, 2015).

A eficiência energética é um elemento central na concepção de edifícios sustentáveis e na busca por operações mais econômicas e amigáveis ao meio ambiente. Os vidros inteligentes desempenham um papel crucial nesse contexto, ao possibilitar o controle dinâmico da entrada de luz e calor. A redução do consumo energético associado ao HVAC não apenas resulta em economia financeira para os ocupantes, mas também em uma contribuição concreta para a redução do impacto ambiental do edifício, reforçando sua posição como uma construção ambientalmente responsável (SUZUKI, 2022).

A introdução de tecnologias como os vidros inteligentes representa um avanço significativo na busca por edifícios mais eficientes e sustentáveis. A redução do consumo energético e das emissões de gases de efeito estufa associadas ao uso de vidros inteligentes não apenas atende a requisitos ambientais cada vez mais rigorosos, mas também reflete uma visão de construção civil mais inovadora e responsável. Ao integrar essas soluções em projetos arquitetônicos, promove-se não apenas a eficiência operacional, mas também uma abordagem mais consciente e sustentável para o desenvolvimento do ambiente construído (OLIVEIRA; SEMAAN; PONZIO, 2015).

A seleção criteriosa de materiais desempenha um papel essencial na busca pela sustentabilidade na produção de vidros inteligentes. Optar por materiais recicláveis e de baixo impacto ambiental é um passo significativo em direção a uma cadeia de produção mais sustentável. A incorporação de elementos ecologicamente

corretos na composição dos vidros inteligentes não apenas reduz a demanda por recursos naturais finitos, mas também contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados à extração e processamento de matérias-primas (MOHAMED, 2017).

Além da escolha de materiais, os processos de fabricação desempenham um papel crucial na determinação da pegada ambiental dos vidros inteligentes. A adoção de métodos de produção mais limpos e eficientes é um componente essencial na promoção da sustentabilidade global da indústria de vidros. Isso inclui práticas que visam a minimização de resíduos, a redução do consumo energético e a otimização do uso de água, contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados à fabricação desses materiais (TAHER; ABDELKADER; FAHIM, 2022).

A utilização de materiais recicláveis na produção de vidros inteligentes representa um avanço significativo em direção a uma economia circular e sustentável. Ao incorporar componentes que podem ser reciclados e reutilizados no ciclo produtivo, reduz-se a dependência de recursos naturais virgens, promovendo a conservação dos ecossistemas naturais. Também é possível verificar que a escolha de materiais recicláveis contribui para a redução do volume de resíduos sólidos gerados, fortalecendo a responsabilidade ambiental da indústria de vidros inteligentes (MOHAMED, 2017).

A eficiência dos processos de fabricação é um fator determinante para a sustentabilidade da indústria de vidros inteligentes. A implementação de técnicas avançadas que visam a otimização dos recursos, como a reciclagem de água, a redução de emissões atmosféricas e a implementação de práticas de gestão de resíduos, tem um impacto direto na minimização dos impactos ambientais associados à produção desses materiais. Essas práticas demonstram um compromisso com a redução do impacto ambiental, ao mesmo tempo em que promovem a eficiência operacional e econômica (TAHER; ABDELKADER; FAHIM, 2022).

A busca por materiais sustentáveis e processos de produção mais eficientes na indústria de vidros inteligentes reflete não apenas um compromisso com a responsabilidade ambiental, mas também uma visão de negócios alinhada com as demandas da sociedade contemporânea. Ao adotar práticas que promovem a

sustentabilidade, a indústria de vidros inteligentes contribui para a construção de um setor mais inovador, competitivo e ambientalmente consciente. A integração de materiais ecologicamente corretos e métodos de produção limpa representa um passo significativo em direção a um futuro mais sustentável para essa importante indústria (MOHAMED, 2017).

A regulação eficiente da entrada de luz e calor proporcionada pelos vidros inteligentes desempenha um papel crucial na promoção do conforto térmico e visual dos ocupantes. Ao adaptar-se dinamicamente às condições externas, esses vidros garantem um ambiente interno mais agradável e propício ao bem-estar. A manutenção de níveis adequados de luminosidade e temperatura contribui para a criação de espaços mais confortáveis e funcionais, atendendo às necessidades físicas e psicológicas dos ocupantes (CANNAVALE et al., 2020).

A qualidade do ar interior é um componente essencial para a saúde e o bem-estar dos ocupantes de um edifício. Os vidros inteligentes, em conjunto com sistemas de ventilação eficientes, desempenham um papel vital na promoção de um ambiente interior saudável. Ao permitir o controle da entrada de ar fresco e a minimização da exposição a poluentes externos, esses vidros contribuem para a manutenção de níveis adequados de qualidade do ar, reduzindo os riscos associados a alergias e doenças respiratórias (CANNAVALE et al., 2013).

Ambientes bem iluminados e termicamente confortáveis têm um impacto direto na produtividade e na satisfação dos ocupantes. Os vidros inteligentes, ao proporcionarem uma regulação eficaz da entrada de luz natural, criam espaços mais agradáveis e propícios ao desempenho das atividades cotidianas. Além disso, o controle térmico oferecido por esses vidros contribui para a criação de condições ideais de trabalho, minimizando desconfortos relacionados a temperaturas extremas e promovendo a eficiência e a satisfação dos ocupantes (CANNAVALE et al., 2020).

A incidência excessiva de luz solar direta pode resultar em ofuscamento e desconforto visual para os ocupantes de um edifício. Os vidros inteligentes, ao oferecerem um controle dinâmico da transmissão de luz, minimizam os efeitos indesejados da iluminação excessiva. Essa capacidade de adaptação às condições externas garante que os espaços internos permaneçam bem iluminados e

visualmente confortáveis, sem comprometer a saúde ocular dos ocupantes (CANNAVALE et al., 2013).

A integração de vidros inteligentes em edifícios vai além da eficiência energética e do controle ambiental, contribuindo de forma significativa para o bem-estar e a qualidade de vida dos ocupantes. Ao criar ambientes internos mais saudáveis, confortáveis e propícios ao trabalho e ao convívio, essa tecnologia desempenha um papel vital na promoção da saúde e do bem-estar daqueles que utilizam os espaços. A melhoria do conforto térmico e visual, a qualidade do ar interior e a promoção da produtividade são apenas algumas das maneiras pelas quais os vidros inteligentes impactam positivamente a experiência dos ocupantes em ambientes construídos (CANNAVALE et al., 2020).

5. Resultados e Discussão

No estudo conduzido por Monteiro (2014), foi elaborado um controlador eletrônico de potência que demonstrou eficácia ao gerenciar a transição da janela inteligente entre os estados opaco e transparente. Este controlador foi concebido com o propósito de ser o único componente necessário para o funcionamento das janelas inteligentes, eliminando assim a necessidade de utilizar uma variedade de dispositivos isolados interconectados para alcançar o mesmo objetivo.

No estudo de Susuki (2022), o propósito foi estabelecer configurações otimizadas de parâmetros para a gestão operacional de janelas em ambientes de escritório nas cidades de São Paulo, Curitiba e Recife, levando em consideração duas técnicas visando eficiência energética: vidro eletrocromico e ventilação híbrida. Foram conduzidas simulações paramétricas envolvendo três tipos de vidro para aplicação em janelas de edifícios comerciais: laminado incolor, vidro insulado duplo com controle solar e vidro eletrocromico. Foi delineado um processo operacional para a tomada de decisão em simulações de consumo energético, estabelecendo diretrizes para combinar cinco tipos de controles eletrocromicos com cinco formas de controle de ventilação híbrida, que seriam uma estratégia de gestão do fluxo de ar dentro de edifícios que combina diferentes métodos de ventilação para otimizar o conforto térmico e a eficiência energética. A abordagem híbrida geralmente envolve a integração de sistemas de ventilação natural e mecânica, utilizando sensores e algoritmos para decidir o momento e a forma como cada sistema deve operar.

Os resultados obtidos com a utilização de janela eletrocromica revelaram uma economia de até 8,6% em Curitiba, 7,5% em Recife e 6,1% em São Paulo, em comparação com o vidro laminado. A análise dos resultados foi conduzida a partir do conjunto de soluções ótimas delineadas pela fronteira de Pareto. Nas cidades de São Paulo e Curitiba, as configurações ótimas envolveram a combinação de controle eletrocromico baseado na radiação solar incidente na fachada e controle de ventilação híbrida com pontos de ajuste mais baixos, variando entre 15°C e 23°C. Em Recife, a configuração ótima uniu o controle eletrocromico orientado pela temperatura do ar externo e controle de ventilação híbrida com ponto de ajuste mais elevado, de 25°C. A viabilidade econômica da janela eletrocromica se demonstrou limitada em climas mais quentes, especialmente em latitudes mais elevadas,

enquanto o procedimento para tomada de decisão revelou-se apropriado para a integração de técnicas de eficiência energética em janelas (SUSUKI, 2022).

O estudo conduzido por Porto (2019) teve como propósito a elaboração de um vidro eletrocromico e a avaliação de suas características ópticas. Adicionalmente, a pesquisa visou analisar o desempenho termoenergético de uma construção destinada a atividades típicas de escritório, na qual se empregou o vidro eletrocromico. A investigação foi realizada por meio de um estudo experimental comparativo, envolvendo vidros convencionais de 3mm e 6mm, em contraste com o vidro eletrocromico *Sage Glass* de 9mm.

O objetivo era examinar o consumo de energia e o conforto térmico, resultantes do uso de sistemas de climatização artificial e ventilação natural, respectivamente. No que diz respeito à caracterização óptica do vidro eletrocromico desenvolvido experimentalmente, foram empregados os procedimentos delineados por Pizzutti (2002), com ajustes específicos. Este processo foi aplicado tanto para o vidro descolorido quanto para o vidro colorido. Para as simulações computacionais, recorreu-se ao *software EnergyPlus*, sendo as simulações conduzidas em duas zonas bioclimáticas, a Zona Bioclimática 2 (ZB 2) e a Zona Bioclimática 8 (ZB 8), utilizando os dados climáticos das cidades de Camaquã e Manaus, respectivamente (PORTO, 2019).

Os resultados indicaram que o vidro eletrocromico analisado experimentalmente exibe valores de transmitância e refletância comparáveis aos vidros eletrocromicos disponíveis comercialmente. Além disso, foi observado que a edificação equipada com o vidro eletrocromico desenvolvido experimentalmente proporcionou um nível superior de conforto térmico durante as horas ocupadas. Adicionalmente, notou-se que o consumo de energia para resfriamento diminuiu à medida que a coloração do vidro aumentou, especialmente na Zona Bioclimática 8, em virtude das condições climáticas quentes dessa região. Observou-se também que, na Zona Bioclimática 2, em determinados meses do ano, o vidro eletrocromico permaneceu completamente descolorido, devido à temperatura de referência que era constantemente superior à temperatura ambiente (PORTO, 2019).

6. Conclusão

A presente investigação demonstrou que os vidros inteligentes representam uma inovação de grande relevância no contexto da construção civil contemporânea. A capacidade de alterar suas propriedades ópticas em resposta a estímulos externos oferece uma solução promissora para a otimização do consumo energético e o aprimoramento do conforto ambiental nas edificações. Os resultados obtidos ao longo deste estudo indicam que a aplicação de vidros inteligentes pode resultar em significativas reduções no consumo de energia, proporcionando benefícios econômicos e ambientais substanciais.

Contudo, é imperativo reconhecer que a plena implementação dos vidros inteligentes na construção civil não é isenta de desafios. Questões relacionadas à durabilidade, custo e complexidade de instalação necessitam de uma atenção cuidadosa. Além disso, a viabilidade econômica desses sistemas em diferentes contextos climáticos e geográficos requer uma análise minuciosa. Estratégias de custo-benefício devem ser desenvolvidas para orientar decisões de projeto e investimento.

Ademais, é essencial ressaltar que a combinação de técnicas inovadoras, como os vidros inteligentes, podendo melhorar a condição térmica do ambiente e por consequência diminuir o gasto elétrico tais como vidros fotocromicos e eletrocromicos ou simplesmente gerando energia como os vidros fotovoltaicos com outras soluções de eficiência energética pode potencializar ainda mais os resultados positivos. A integração dessas tecnologias em um contexto mais amplo de *design* sustentável e estratégias de construção verde pode promover sinergias valiosas, resultando em edificações mais eficientes e sustentáveis para o meio ambiente.

No Brasil, observa-se uma lacuna significativa no conhecimento sobre vidros inteligentes, juntamente com um investimento limitado nesta área específica. Essa realidade contribui para a elevação dos preços desses produtos, resultando em um custo-benefício menos atrativo. Como resultado, a adoção e a atenção a essa tecnologia ainda são limitadas, refletindo a necessidade de maior conscientização e

investimento para promover o avanço e a acessibilidade dos vidros inteligentes no mercado brasileiro.

Nesse sentido, é crucial fomentar a pesquisa e o desenvolvimento contínuo nesta área, visando aprimorar a eficácia e acessibilidade dos vidros inteligentes. Iniciativas interdisciplinares e colaborativas entre a comunidade acadêmica, indústria e setor governamental são fundamentais para impulsionar a inovação e acelerar a adoção dessa tecnologia no setor da construção civil.

Referências

ADACHI, Kenta et al. Kinetics of coloration in photochromic tungsten (VI) oxide/silicon oxycarbide/silica hybrid xerogel: insight into cation self-diffusion mechanisms. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 8, n. 22, p. 14019-14028, 2016.

ADAMIDIS, Marios; KONIDAKIS, Ioannis; STRATAKIS, Emmanuel. Post-glass melting synthesis and photochromic properties of composite AgCl-AgPO₃ glasses. **Journal of Materiomics**, v. 9, n. 3, p. 455-463, 2023.

AL-QAHTANI, Salhah D. et al. Preparation of photoluminescent and photochromic smart glass window using sol-gel technique and lanthanides-activated aluminate phosphor. **Ceramics International**, v. 48, n. 12, p. 17489-17498, 2022.

ALL ABOUT THAT GLASS. Vidro eletrocromico: o que é? Disponível em: <https://allaboutthatglass.wordpress.com/2015/07/24/vidro-eletrocromico-oi/>. Acesso em: 24 jun. 2024 às 15:43.

ALTOMONTE, Sergio; SAADOUNI, Sara; SCHIAVON, Stefano. **Occupant satisfaction in LEED and BREEAM-certified office buildings**. 2016.

ANDRADE, Max. **Análise nas fachadas cinética e dinâmica: um estudo de design sobre técnicas e modelos conceituais**. 2022.

ARCH GLASS BRASIL. Tipos de vidro: vidro fotovoltaico - o que é e como funciona? Disponível em: <https://archglassbrasil.com.br/artigos/tipos-de-vidro/vidro-fotovoltaico-o-que-e-e-com-o-funciona/>. Acesso em: 22 jan. 2024 às 19:11.

ARCH GLASS BRASIL. Vidro polarizado: o que é? Disponível em: <https://archglassbrasil.com.br/artigos/vidro-polarizado-o-que-e/>. Acesso em: 29 abr. 2024 às 16:18.

ARCH GLASS BRASIL. Vidro recozido. Disponível em: <https://archglassbrasil.com.br/dicionario/vidro-recozido/>. Acesso em: 29 abr. 2024 às 15:15.

ARCHDAILY BRASIL. Superando desafios projetuais com tecnologia: Museu do Futuro em Dubai. Disponível em: https://www.archdaily.com.br/br/983953/superando-desafios-projetuais-com-tecnologia-a-museu-do-futuro-em-dubai/62b326222c50db016721f0d8-superando-desafios-projetuais-com-tecnologia-museu-do-futuro-em-dubai-imagem?next_project=no. Acesso em: 24 jun. 2024 às 16:25.

ARCHDAILY. 1 Angel Square. Disponível em:

<https://www.archdaily.com/337430/1-angel-square-3d-reid/512e54a2b3fc4b2d6a000276-1-angel-square-3d-reid-photo>. Acesso em: 22 jan. 2024 às 18:16.

ARCHDAILY. One Central Park. Disponível em:

<https://www.archdaily.com/758761/one-central-park-ateliers-jean-nouvel>. Acesso em: 24 jun. 2024 às 16:33.

ARCHDAILY. The Edge. Disponível em:

<https://www.archdaily.com/785967/the-edge-plp-architecture/57181d2ae58ecef7000008-the-edge-plp-architecture-photo>. Acesso em: 22 jan. 2024 às 18:08.

ASHOK, Ashwin et al. What am i looking at? low-power radio-optical beacons for in-view recognition on smart-glass. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 15, n. 12, p. 3185-3199, 2016.

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e engenharia dos materiais**. Cengage Learning, 2023.

BALAN, B. A.; ACHINTHA, M. Assessment of stresses in float and tempered glass using eigenstrains. **Experimental Mechanics**, v. 55, p. 1301-1315, 2015.

BARROS, Ana Rita Oliveira. **Desenvolvimento e caracterização de filmes finos transparentes para aplicações óticas**. 2017. Tese de Doutorado.

BERTICELLI, Ritelli et al. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. I **Seminário de Pesquisa Científica e Tecnológica**, v. 1, n. 1, 2017.

BISOYI, Hari Krishna; LI, Quan. Liquid crystals: versatile self-organized smart soft materials. **Chemical Reviews**, v. 122, n. 5, p. 4887-4926, 2021.

BOX PARA BANHEIRO. Vidro laminado incolor. Disponível em:

<https://www.boxparabanheiro.ind.br/vidro-comum-ou-laminado/vidro-laminado-incolor>. Acesso em: 29 abr. 2024 às 15:19.

BRZEZICKI, Marcin. A systematic review of the most recent concepts in smart windows technologies with a focus on electrochromics. **Sustainability**, v. 13, n. 17, p. 9604, 2021.

CAI, Guofa; WANG, Jiangxin; LEE, Pooi See. Next-generation multifunctional electrochromic devices. **Accounts of chemical research**, v. 49, n. 8, p. 1469-1476, 2016.

CANNAVALE, Alessandro et al. Smart electrochromic windows to enhance building energy efficiency and visual comfort. **Energies**, v. 13, n. 6, p. 1449, 2020.

CANNAVALE, Alessandro et al. Visual comfort assessment of smart photovoltachromic windows. **Energy and Buildings**, v. 65, p. 137-145, 2013.

CASINI, Marco. Smart windows for energy efficiency of buildings. In: **Proceedings of**

the Second International Conference on Advances in Civil, Structural, and Environmental Engineering. 2014.

CHAVES, Walter Gil Reis. **Análise energética a um edifício com a perspectiva de aplicação de vidros electrocromáticos na redução de consumos.** 2020.

CHUA, Ming Hui et al. **Introduction to electrochromism.** 2019.

COBOS, Antonio et al. **Sistemas complexos com surfactante aniônico em soluções salinas com água (sais: CsCl e CaCl).** 2013.

COELHO, Thays Fernandes; SERRA, Juan Carlos Valdés. Tecnologias para reciclagem de sistemas fotovoltaicos: impactos ambientais. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 15, n. 7, 2018.

COISAS DO JAPÃO. Os banheiros públicos transparentes no Japão: a invenção para acabar com os problemas. Disponível em: <https://coisasdojapao.com/2020/08/os-banheiros-publicos-transparentes-no-japao-a-invencao-para-acabar-com-os-problemas/>. Acesso em: 29 abr. 2024 às 16:12.

COSTA, João Francisco Walter; AMORIM, Cláudia Naves David. MATERIAIS TRANSPARENTES E TRANSLÚCIDOS INOVADORES EM FACHADAS: CONFORTO VISUAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS NÃO-RESIDENCIAIS NO BRASIL. **ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 16, p. 1733-1742, 2021.

COSTA, João Francisco Walter; AMORIM, Cláudia Naves David. Materiais transparentes e translúcidos inovadores em fachadas e seu desempenho em iluminação natural: panorama internacional e aplicabilidade no contexto brasileiro. **Ambiente Construído**, v. 22, p. 179-198, 2022.

CUNHA, Inês Isabel Fortuna Neves Fernandes da. **Desenvolvimento de nanofilmes à base de óxido de tungstênio para aplicações em transístores electrocrômicos.** 2013. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

DA SILVA PORTO, Joseane et al. Desempenho termoenergético e luminoso de uma edificação de escritório com a utilização de vidros electrocrômicos. **Revista Matéria**, v. 25, n. 3.

DE OLIVEIRA, Renato S.; SEMAAN, Felipe S.; PONZIO, Eduardo Ariel. Janelas Electrocrômicas: uma nova era em eficiência energética. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, p. 336-356, 2015.

FARRELL, C. C. et al. Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 128, p. 109911, 2020.

FERREIRA, Hilma; MOREIRA, Fernanda; ANDRADE, Amilton. **Bioinspired Smart**

Façades: an approach in architectural and design project models. 2023.

FONSECA, Mariana. **Sistemas supra-anfifílicos derivados de meglumina e ácido oleico: síntese, caracterização e potencial aplicação no âmbito farmacêutico.** 2017.

FRANCO, Carlos Manuel. **Nanomateriais na Reabilitação de Património Arquitetónico.** 2017.

GAO, Yanzi et al. A novel soft matter composite material for energy-saving smart windows: from preparation to device application. **Journal of materials chemistry A**, v. 3, n. 20, p. 10738-10746, 2015.

GARLISI, Corrado et al. Multilayer thin film structures for multifunctional glass: Self-cleaning, antireflective and energy-saving properties. **Applied energy**, v. 264, p. 114697, 2020.

GLASS MANUFACTURER CHINA. China 2mm anti-reflective glass factory - 2mm AR coating glass for picture frame. Disponível em: <https://www.glassmanufacturerchina.com/pt/products/China-2mm-anti-reflective-glass-factory-2mm-AR-coating-glass-for-picture-frame.html>. Acesso em: 29 abr. 2024 às 15:28.

GONÇALVES, Lidiane Patricia. **Ormosils fotoativos com fosfotungstato dopados com nanopartículas SiO₂@ TiO₂ e NP de Ag: avaliação fotocromica e potencial de inibição bactericida frente às bactérias Staphylococcus aureus e Pseudomona aeruginosa.** 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GONÇALVES, Pedro Miguel Firmino. **Fachada de vidro “inteligente”.** 2012. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

GRANQVIST, Claes G. Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices. **Thin solid films**, v. 564, p. 1-38, 2014.

GU, Chang et al. Emerging electrochromic materials and devices for future displays. **Chemical Reviews**, v. 122, n. 18, p. 14679-14721, 2022.

HEMAIDA, Abdulmohsin et al. Evaluation of thermal performance for a smart switchable adaptive polymer dispersed liquid crystal (PDLC) glazing. **Solar Energy**, v. 195, p. 185-193, 2020.

ISLAM, Md Tobibul; AHMAD, Mohiuddin; SHINGHA BAPPY, Akash. Development of a microprocessor based smart and safety blind glass system. In: **2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2)**. IEEE, 2019. p. 1-4.

ISLAM, Muhammad Shahriyar et al. Internet of things-enabled smart controller for polymer dispersed liquid crystals films. **International Journal of Electrical &**

Computer Engineering (2088-8708), v. 13, n. 4, 2023.

JOSEPH, Benedicto; POGREBNAYA, Tatiana; KICHONGE, Baraka. Semitransparent building-integrated photovoltaic: review on energy performance, challenges, and future potential. **International Journal of Photoenergy**, v. 2019, p. 1-17, 2019.

JUSBRASIL. Vidro temperado, laminado, comum, entre outros. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/artigos/vidro-temperado-laminado-comum-entre-outros/844438190>. Acesso em: 29 abr. 2024 às 15:17.

KEDGLOBAL. Real estate news view. Disponível em: <https://www.kedglobal.com/real-estate/newsView/ked202306190020>. Acesso em: 24 jun. 2024 às 16:20.

KHALIGH, Hadi Hosseinzadeh et al. Silver nanowire transparent electrodes for liquid crystal-based smart windows. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 132, p. 337-341, 2015.

KHANDELWAL, Hitesh; SCHENNING, Albertus PHJ; DEBIJE, Michael G. Infrared regulating smart window based on organic materials. **Advanced Energy Materials**, v. 7, n. 14, p. 1602209, 2017.

KHANDELWAL, Hitesh et al. Electrically switchable polymer stabilised broadband infrared reflectors and their potential as smart windows for energy saving in buildings. **Scientific reports**, v. 5, n. 1, p. 11773, 2015.

KING, Jennifer; PERRY, Christopher. **Smart buildings: Using smart technology to save energy in existing buildings**. Washington, DC, USA: American Council for an Energy-Efficient Economy, 2017.

KÜCHEMANN, Stefan et al. Energy storage in metallic glasses via flash annealing. **Advanced Functional Materials**, v. 28, n. 50, p. 1805385, 2018.

LANDARIN, Daiane Mendes. **Propriedades fotocromáticas e eletrocromáticas dos filmes de WO₃, WO₃: Li⁺ e WO₃: Li⁺: ZrO₂**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

LANGARO, Diego Darci et al. **Avaliação do desempenho de um retardador de cristal líquido para aplicação em shearografia**. 2013.

LE BOURHIS, Eric. **Glass: mechanics and technology**. John Wiley & Sons, 2014.

LENSCOPE. Lentes fotocromáticas: vantagens e desvantagens. Disponível em: <https://lenscope.com.br/blog/lentes-fotocromaticas-vantagens-e-desvantagens/>. Acesso em: 24 jun. 2024 às 16:17.

LI, Cheng-Chang et al. Versatile energy-saving smart glass based on tristable cholesteric liquid crystals. **ACS Applied Energy Materials**, v. 3, n. 8, p. 7601-7609, 2020.

LIU, Qingxian et al. Highly transparent and flexible iontronic pressure sensors based on an opaque to transparent transition. **Advanced Science**, v. 7, n. 10, p. 2000348, 2020.

LOI, Monique da Rocha. **Influência do ZrO₂ nas propriedades eletrocromicas do filme de V₂O₅**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas

LV, Shichao et al. Transition metal doped smart glass with pressure and temperature sensitive luminescence. **Advanced Optical Materials**, v. 6, n. 21, p. 1800881, 2018.

MACHADO, Elyvander da Rosa et al. **SÍNTESE DE CRISTAIS LÍQUIDOS CURVADOS DERIVADOS DA CROMONA**. 2022.

MARTÍN, Marc et al. Polymeric interlayer materials for laminated glass: A review. **Construction and building materials**, v. 230, p. 116897, 2020.

MENG, Qinghua et al. Preparation of a fast photochromic ormosil matrix coating for smart windows. **Journal of Materials Science**, v. 48, p. 5862-5870, 2013.

MOHAMED, Abeer Samy Yousef. Smart materials innovative technologies in architecture; towards innovative design paradigm. **Energy Procedia**, v. 115, p. 139-154, 2017.

MONTEIRO, Fernando Jorge Chapita de Castro. **Janelas inteligentes com efeito de memória**. 2014. Tese de Doutorado.

NALIN, Marcelo et al. Glassy materials and light: part 1. **Quimica Nova**, p. 328-339, 2016.

NETTO, Michele Soares. **Modelagem e simulação termoenergética de um sistema híbrido de trocador de calor solo-ar e dispositivos eletrocromicos**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

NIU, Junlong et al. Infrared electrochromic materials, devices and applications. **Applied Materials Today**, v. 24, p. 101073, 2021.

OLIVEIRA, Wilson Aparecido de. **Estudo sistemático sobre a inserção de acilhidrazonas em cristais líquidos policatenares**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PORTO, Joseane da Silva. **Desempenho termoenergético e ótico da janela inteligente por simulação computacional**. 2019.

PORTO, Joseane da Silva et al. Desempenho termoenergético e luminoso de uma edificação de escritório com a utilização de vidros eletrocromicos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 2020.

PRISMATIC. O que é o vidro float? Disponível em: <https://www.prismatic.com.br/o-que-e-o-vidro-float/>. Acesso em: 29 abr. 2024 às

15:23.

PYRRHO, Monique; SCHRAMM, Fermin Roland. **Nanotecnociência e humanidade**. Imprensa da Universidade de Coimbra/Coimbra University Press, 2016.

RASHID, Zulqarnain et al. Cricking: Browsing physical space with smart glass. In: **Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication**. 2014. p. 151-154.

RENZI-HAMMOND, Lisa M.; HAMMOND, Billy R. The effects of photochromic lenses on visual performance. **Clinical and Experimental Optometry**, v. 99, n. 6, p. 568-574, 2016.

RESEARCHGATE. Esquema ilustrativo do aparecimento das mesofases líquido cristalinas. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-ilustrativo-do-aparecimento-das-mesofases-liquido-cristalinas-a_fig1_250985743. Acesso em: 29 abr. 2024 às 15:58.

RIBEIRO, D. Gestão inteligente de energia em consumidores residenciais. **Ms. C. thesis, Universidade Estadual de Campinas, Brasil**, 2016.

ROSSEINSKY, David R.; MONK, Paul MS; MORTIMER, Roger J. (Ed.). **Electrochromic materials and devices**. John Wiley & Sons, 2015.

RUGGIERO, Silvia et al. Energy saving through building automation systems: Experimental and numerical study of a smart glass with liquid crystal and its control logics in summertime. **Energy and Buildings**, v. 273, p. 112403, 2022.

SANTOS, Rafael Vieira dos et al. **Dinâmica de reorientação de cristais líquidos nemáticos dopados com nanopartículas de ouro**. 2016.

SETZ, Luiz Fernando Grespan; DA SILVA, Antonio Carlos. **O processamento cerâmico sem mistério**. Editora Blucher, 2019.

SILVA, Ana Filipa Martinho. **Design interativo, tecnologia e natureza**. 2016.

SORGATO, M. J.; SCHNEIDER, K.; RÜTHER, R. Technical and economic evaluation of thin-film CdTe building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate. **Renewable Energy**, v. 118, p. 84-98, 2018.

SUZER, Ozge. Analyzing the compliance and correlation of LEED and BREEAM by conducting a criteria-based comparative analysis and evaluating dual-certified projects. **Building and Environment**, v. 147, p. 158-170, 2019.

SUZUKI, Eliane Hayashi. **Processo de tomada de decisão para otimização em conforto térmico e eficiência energética integrando janelas inteligentes e**

ventilação híbrida nos climas subtropical e tropical. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TAHER, Reem; ABDELKADER, Walid Abdelmoneim; FAHIM, Ahmed A. Medhat A. Sustainable Building: To Achieve Thermal Comfort in Highly Glazed Buildings Using Smart Glass. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.** IOP Publishing, 2022. p. 012021.

TÄLLBERG, Rickard 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, p. 109828, 2019.

TAVARES, Fabiele Collovini. **Preparação e Caracterização de Eletrólitos Sólidos Poliméricos à Base de Goma Xantana.** 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

TAVARES, Paulo et al. Control criteria of electrochromic glasses for energy savings in mediterranean buildings refurbishment. **Solar Energy**, v. 134, p. 236-250, 2016.

TORRES-PIERNA, Héctor; RUIZ-MOLINA, Daniel; ROSCINI, Claudio. Highly transparent photochromic films with a tunable and fast solution-like response. **Materials Horizons**, v. 7, n. 10, p. 2749-2759, 2020.

UUSITALO, Olavi. **Float glass innovation in the flat glass industry.** Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2014.

VAN DER VOORDT, Theo JM; VAN WEGEN, Herman BR. **Arquitetura sob o olhar do usuário: programa de necessidades, projeto e avaliação de edificações.** Oficina de textos, 2013.

WANG, Jian et al. 25.5: Applications of Electrochromic Film Technology. In: **SID Symposium Digest of Technical Papers.** 2019. p. 258-260.

WANG, Yang; RUNNERSTROM, Evan L.; MILLIRON, Delia J. **Switchable materials for smart windows.** 2016

WANG, Zhen et al. Fusing electrochromic technology with other advanced technologies: A new roadmap for future development. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 140, p. 100524, 2020.

WOLFE, Daniel; GOOSSEN, K. W. Evaluation of 3D printed optofluidic smart glass prototypes. **Optics Express**, v. 26, n. 2, p. A85-A98, 2018.

WONG, Kaufui V.; CHAN, Richard. Smart glass and its potential in energy savings. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 136, n. 1, p. 012002, 2014.

XU, Weitao et al. Sensor-assisted multi-view face recognition system on smart glass. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 17, n. 1, p. 197-210, 2017.

ZHOU, Jicheng et al. Temperature distribution of photovoltaic module based on finite element simulation. **Solar Energy**, v. 111, p. 97-103, 2015.