



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Materiali intelligenti e finestre intelligenti: un approccio complementare al risparmio energetico

Laurea Triennale in Scienze dei Materiali - A. A. 2023-2024

**Studente: Francesco Bettini**

**Matricola n°: 2009005**

**Relatrice: Prof.ssa Antonella Glisenti**



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

## Elettrocromia come tecnologia «green»:

I dispositivi elettrocromici possiedono la capacità di alterare le loro proprietà ottiche in modo reversibile e duraturo in seguito all'applicazione di un potenziale esterno.

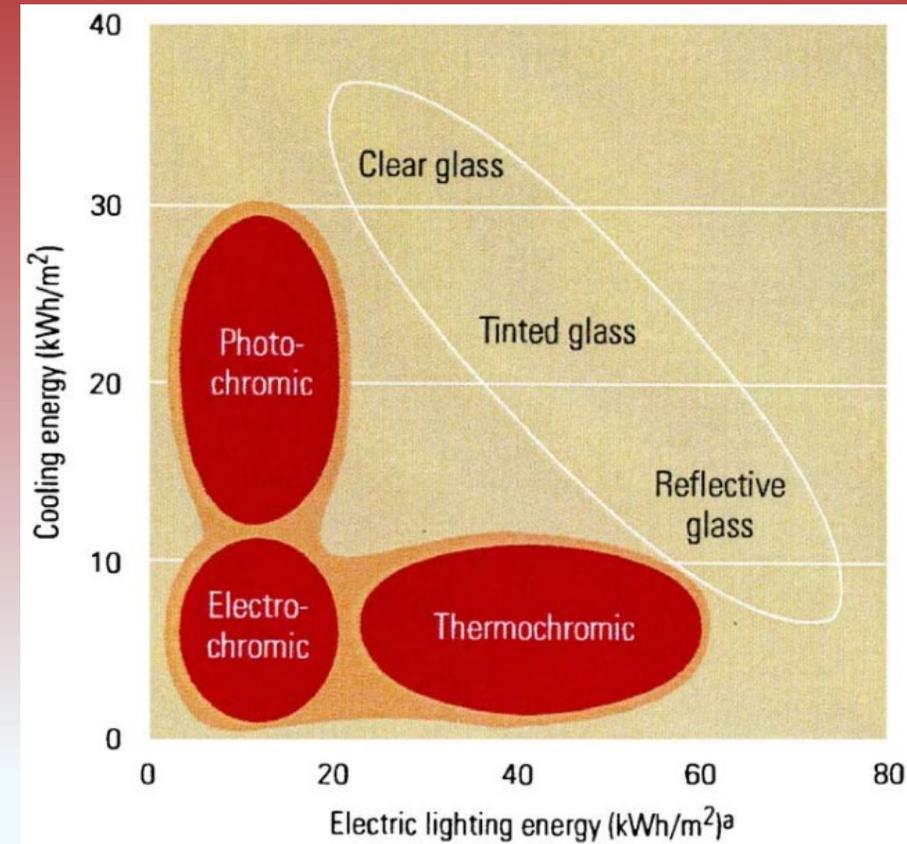
Con l'introduzione nel mercato delle cosiddette «finestre intelligenti», lo sviluppo e l'ottimizzazione di questi dispositivi è diventato un punto chiave nel settore dell'edilizia ad alta efficienza energetica.



*[5] Stato trasparente e stato colorato di una vetrata elettrocromica: Ball State University: Muncie, Indiana*

Numerosi fattori concomitanti sono responsabili dell'incremento dell'interesse verso i dispositivi elettrocromici:

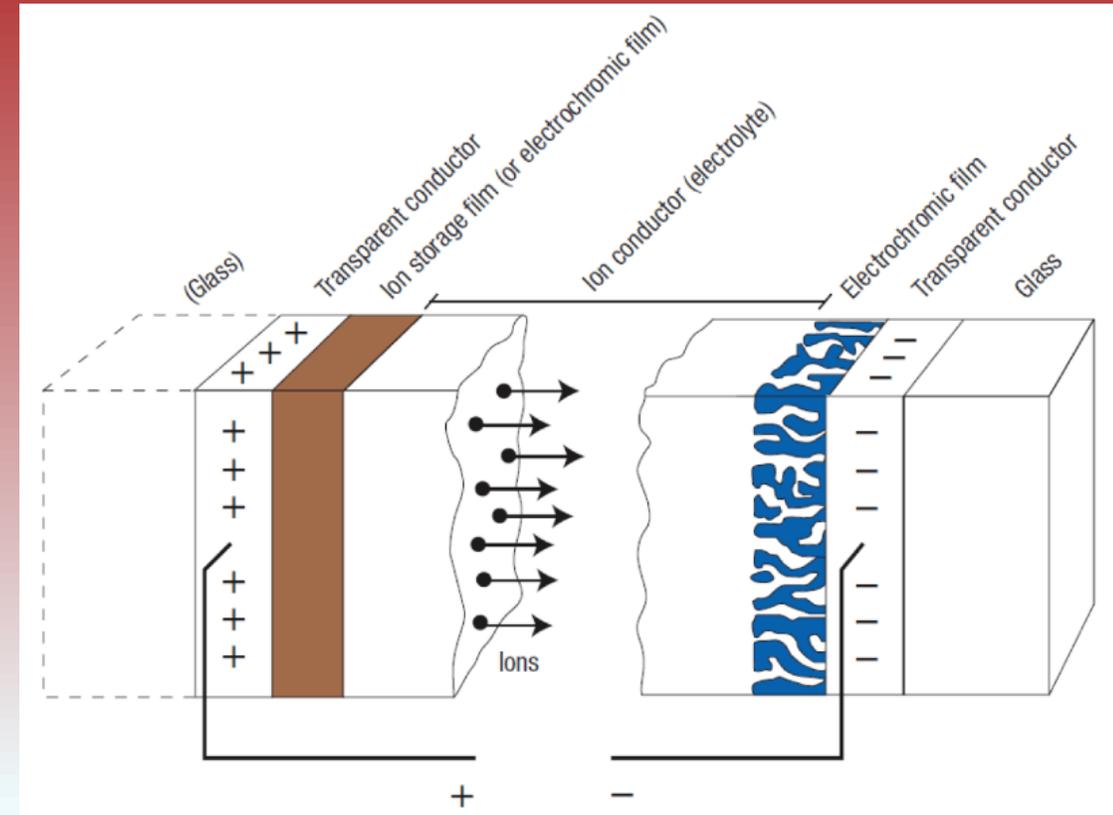
- **Riscaldamento globale**
- **Aumento della domanda energetica**
- **Il 34% dell'energia primaria mondiale è impiegato nel settore edile [UNEP 2022]**
- **Le finestre rappresentano un punto debole nell'efficienza energetica di un edificio.**



[2] Energia di illuminazione e di raffreddamento per diversi tipi di finestre: [https://www.mge.com/business/saving/madison/PA\\_6.html](https://www.mge.com/business/saving/madison/PA_6.html)

## Composizione di un dispositivo EC:

- **Conduttore trasparente:** tipicamente ossido di indio-stagno (ITO)  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$
- **Pellicola elettrocromica:** composta da ossidi di metalli di transizione come  $\text{WO}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{MoO}_3$  responsabili delle proprietà elettrocromiche
- **Conduttore ionico (elettrolita):** polimero o gel, unisce le due pellicole e ne garantisce lo scambio di ioni
- **Pellicola elettrocromica o di accumulo ioni:** composta da ossidi di metalli, aventi anch'essi proprietà elettrocromiche o solamente di controlettrodo

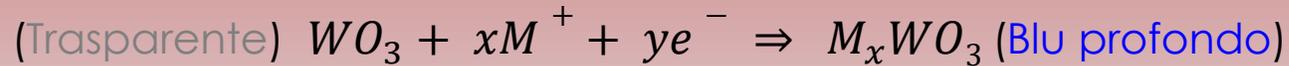


[1] Illustrazione schematica di un dispositivo elettrocromico a strati. (le frecce rappresentano il movimento degli ioni):  
[Granqvist 2006]

## Funzionamento di un dispositivo EC:

Il principio di funzionamento di questi dispositivi si basa su una reazione di ossido-riduzione degli ossidi metallici.

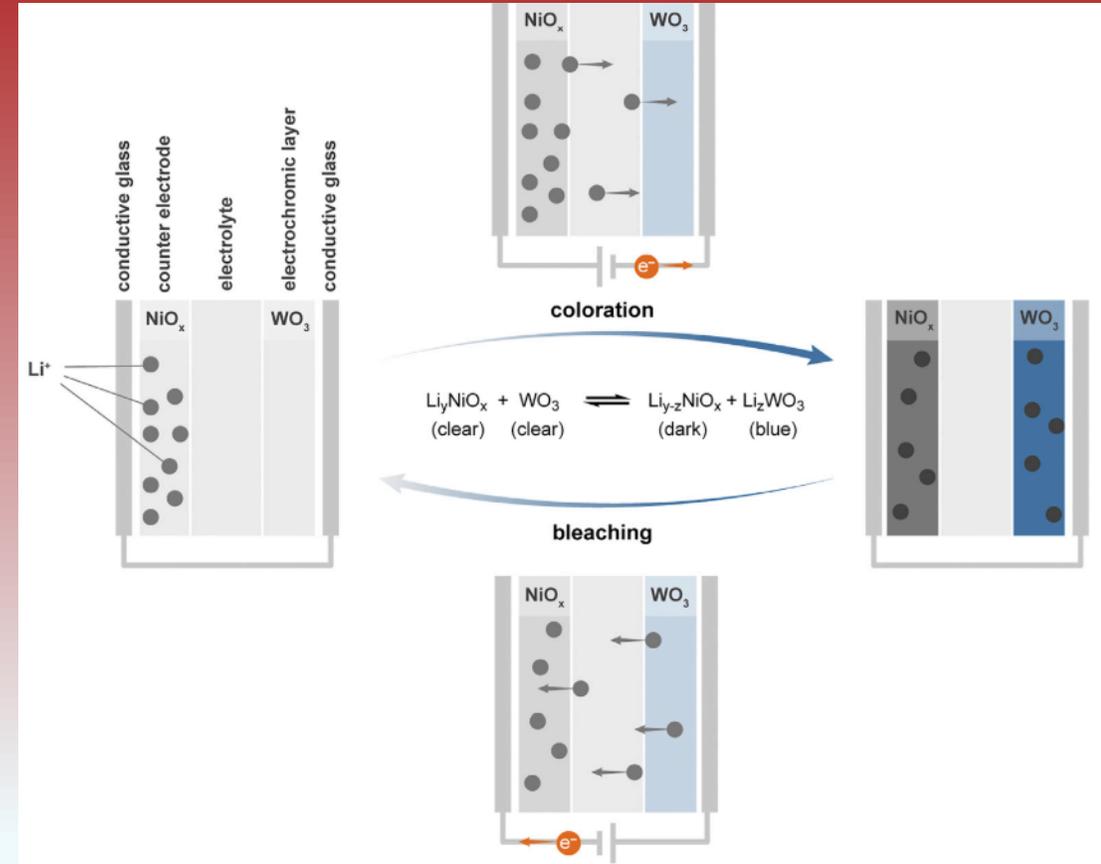
- **Semireazione di riduzione:**



- **Semireazione di ossidazione:**



Il cambiamento nello stato di ossidazione porta a una modifica nella struttura elettronica degli ossidi con un conseguente assorbimento ottico nel visibile



[7] Principio di funzionamento di un dispositivo elettrocromico:  
[Cheng et al., *iScience* 10, 80–86 2018]

## Aspetti nanoscopici:

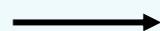
Gli ossidi metallici possiedono coordinazione ottaedrica ( $\text{MeO}_6$ ), la quale, abbinata a una configurazione esagonale, risulta fondamentale per le proprietà elettrocromiche. Influenzate anche dal loro comportamento da semiconduttori

$\text{WO}_3$  puro presenta la banda  $\text{O}2\text{p}$  dell'ossigeno piena e quella  $t_{2g}$  del metallo vuota

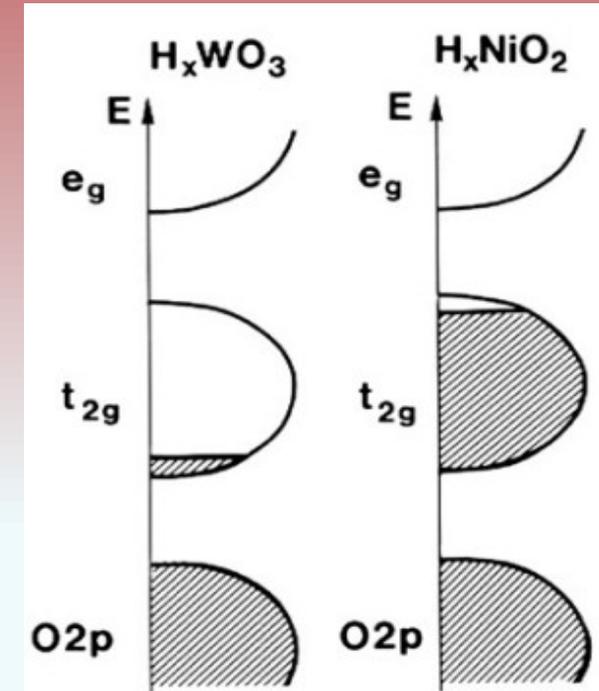


L'inserimento di ioni ed elettroni porta a un parziale riempimento della banda  $t_{2g}$  = assorbimento ottico nel visibile

$\text{NiO}$  puro presenta la banda  $\text{O}2\text{p}$  dell'ossigeno piena e quella  $t_{2g}$  del metallo parzialmente occupata



L'inserimento di ioni ed elettroni porta alla creazione di un gap energetico tra le bande = transizioni negatte



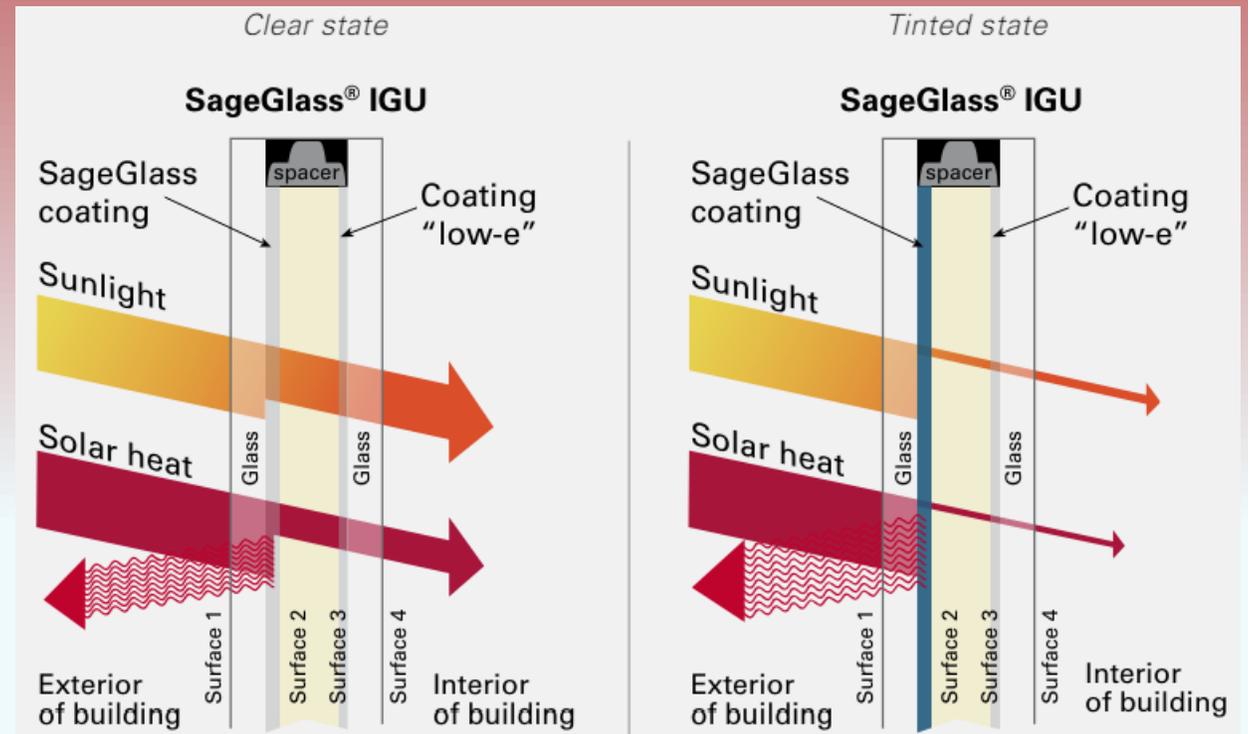
[1] Struttura schematica delle bande dei diversi ossidi EC: [CG Granqvist 1995]

## Caso di studio: SageGlass

Leader nel settore, SageGlass è una consociata a Saint-Gobain e produce le finestre elettrocromiche più utilizzate nel mercato, sia su edifici commerciali che abitativi.

Queste finestre sono progettate per regolare autonomamente la quantità di luce solare e calore che entra in un edificio.

Affiancando questi dispositivi a un sistema di gestione energetica (BEMS) viene sfruttata la raccolta dati e il machine learning per ottimizzarne il funzionamento diminuendone i costi.





## Caratteristiche tecniche:

- **Tensione di attivazione:** da 1 a 3 V in corrente continua
- **Consumo:** 0.5 Wh/m<sup>2</sup>
- **Durabilità:** 30 anni di vita tra i 30 e 60°C (circa 10<sup>5</sup> cicli testati secondo ASTM E-2141-06)
- **Dimensioni:** minime 457x457 mm, massime 1500x3500 mm con uno spessore di 20 mm
- **Tempo medio di completa oscurazione:** tra gli 8 e i 10 minuti

I vetri SageGlass combinano proprietà elettrocromiche alle più comuni di isolamento termico e acustico, anti-riflesso, anti-sfondamento e tempra, rispettando le norme europee: EN 12150, EN 12600, EN 410, EN 1096, EN 1279 che determinano standard di sicurezza e qualità.



## RANGE OF PRODUCT AND PERFORMANCE\*

	Composition	State	According to D65 2°			According to EN410	According to EN673
			Light Transmission	External Reflexion	Internal Reflexion	Solar Factor g	U value W/m <sup>2</sup> K
Double glazing unit	6mm toughened with coating SageGlass® 16mm Spacer - gap Argon filled 90% 6mm heat treated clear float glass	clear	63%	11%	12%	0,47	1,4
		intermediate 1	21%	6%	10%	0,16	1,4
		intermediate 2	6%	5%	9%	0,09	1,4
		tinted	2%	5%	10%	0,06	1,4
	6mm toughened with coating SageGlass® 16mm Spacer - gap Argon filled 90% 6mm heat treated LowE glass (CEN272)	clear	55%	10%	9%	0,39	1,1
		intermediate 1	19%	6%	7%	0,14	1,1
		intermediate 2	5%	5%	7%	0,07	1,1
		tinted	1%	5%	7%	0,05	1,1
Triple glazing unit**	6mm toughened with coating SageGlass® 13mm Spacer - gap Argon filled 90% 6mm heat treated clear glass 13mm Spacer - gap Argon filled 90% 6mm heat treated LowE glass (CEN180)	clear	54%	14%	18%	0,4	0,8
		intermediate 1	19%	6%	16%	0,12	0,8
		intermediate 2	5%	5%	16%	0,06	0,8
		tinted	1%	5%	16%	0,04	0,8

\* Applicable tolerances according to EN1096-4 ; values according to EN410 and EN673

\*\*By filling with Krypton gas instead of Argon, U=0,6W/m<sup>2</sup>K

[4] Caratteristiche e prestazioni delle finestre intelligenti SageGlass a doppio e triplo vetro: <https://dullaartglas.nl/wp-content/uploads/2011/11/QUANTUM-GLASS-ELECTROCHROME-+-DULLAART1.pdf>



## Valutazione delle prestazioni:

Sage commissionò nel 2010 alla Paladino and Co. uno studio comparativo tra le finestre che incorporano vetrate dinamiche e altre vetrate statiche convenzionali o ad alte prestazioni.

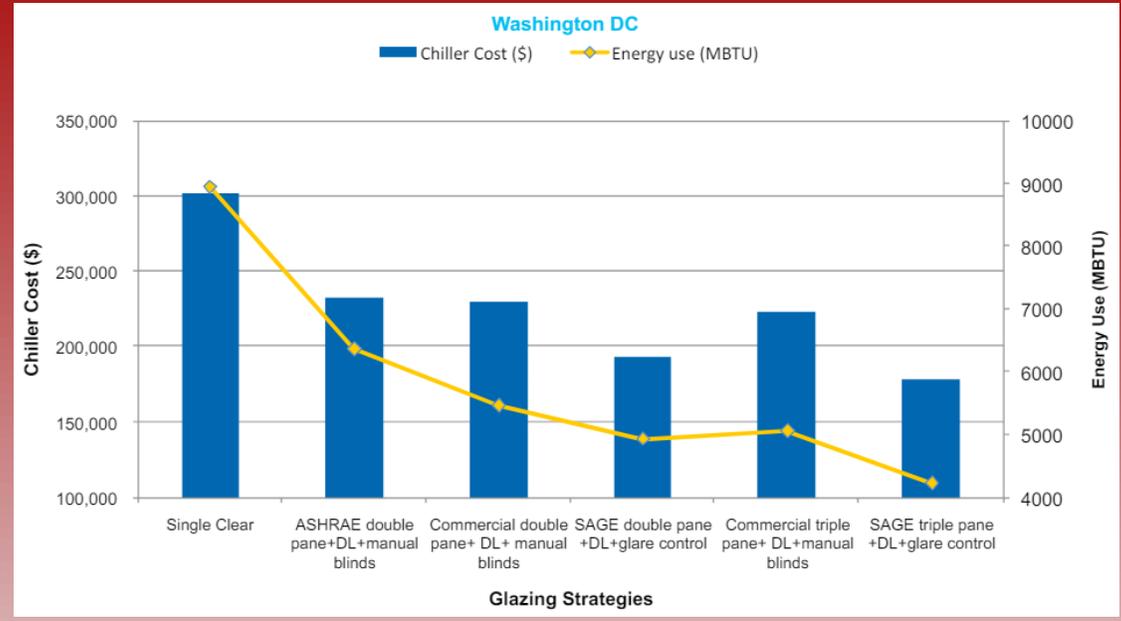
Lo studio è stato condotto tramite simulazioni computerizzate basate sul codice energetico nazionale ASHRAE 90.1-2007, analizzando 3 climi differenti:

- 1) Minneapolis = molto fredda in inverno
- 2) Phoenix = calda e secca
- 3) Washington DC = clima misto

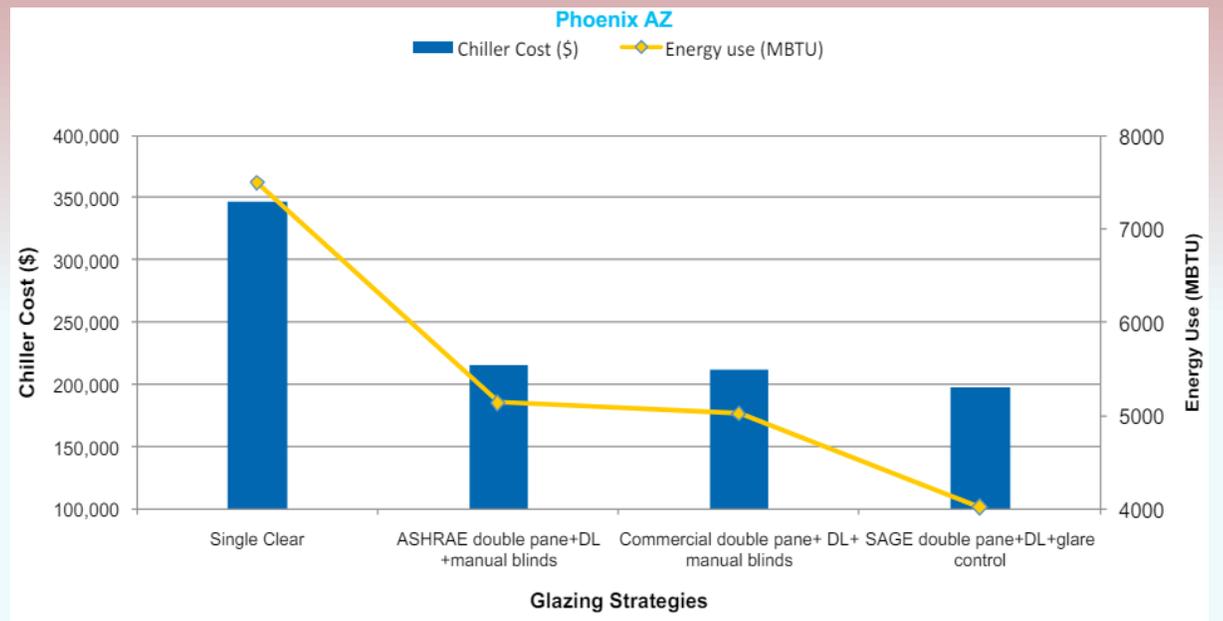
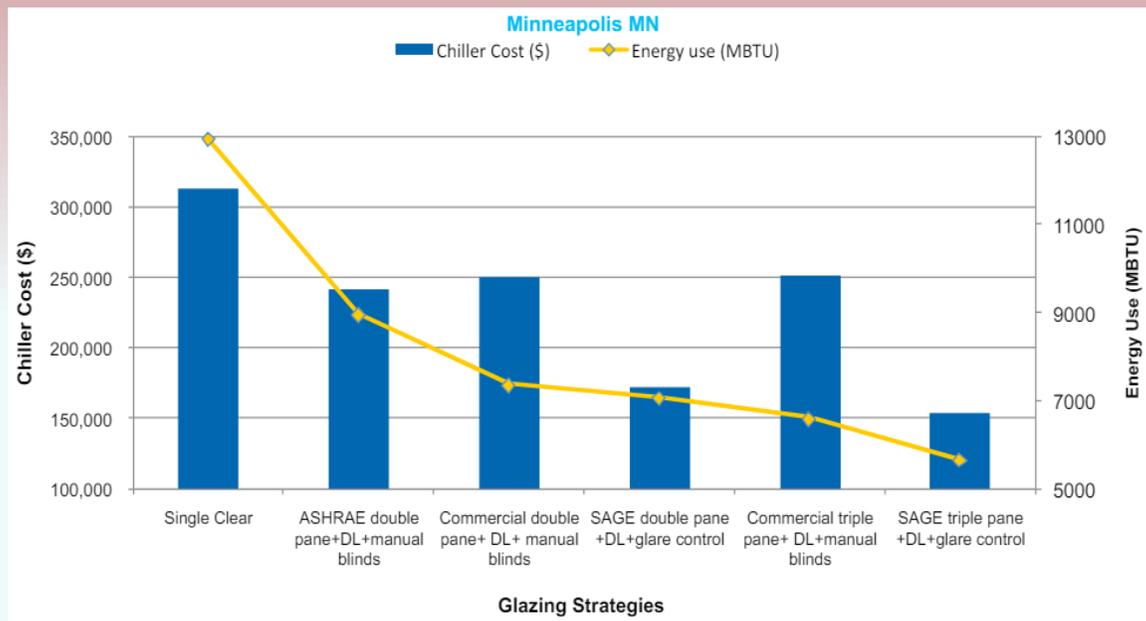
	Static Single Pane (no daylighting controls)	ASHRAE 90.1-2007	Commercial Triple
SageGlass Double	45%	20%	NA
SageGlass Triple	53%	34%	14%

Eight story office building, 160,000 total sq. ft., 60% window-to-wall ratio

[5] *Risparmio energetico annuo minimo per le vetrate dinamiche SageGlass rispetto ai tipi di vetrate commerciali statiche*: SageGlass Energy Performance Modeling June 2010, pag. 2



[5] Consumo energetico e costi di raffreddamento per i diversi climi analizzati, in base al tipo di vetratura utilizzata: SageGlass Energy Performance Modeling June 2010, pag. 9-10





## Sfide e criticità:

Questo tipo di dispositivi presenta alcune criticità e sfide legate ai metodi produttivi e ai materiali utilizzati:

**Produzione** {  
Tecnologie di deposizione e lavorazione avanzate  
Minimo margine di errore e alti costi di produzione

- **Film elettrocromici e del controlettrodo** → Nanoporosità ben definita
- **Conduttori trasparenti** → Eccellente conduttività elettrica e buona trasparenza ottica
- **Elettrolita** → Buona conduttività ionica (minima conduttività elettrica) ed elevata stabilità sotto irradiazione UV

Ulteriori problemi possono derivare dalla presenza di strati multipli e da un'inadeguata strategia di controllo nell'utilizzo del dispositivo.



## Conclusioni:

Le finestre elettrocromiche rappresentano una soluzione innovativa e sostenibile per ridurre il consumo energetico negli edifici e migliorarne il comfort abitativo.

Prodotti come SageGlass dimostrano l'efficacia di queste tecnologie nel risparmio energetico, soprattutto quando integrate con sistemi avanzati di gestione energetica.



## Ringraziamenti

Ringrazio la Prof.ssa Antonella Glisenti per aver reso possibile la realizzazione di questa tesi, avendomi sostenuto nella stesura ed essendosi resa sempre disponibile al dialogo e al confronto.

Ringrazio la mia famiglia, i miei amici e Olga per essermi sempre stati accanto, supportandomi ed incoraggiandomi nel conseguimento di questo percorso accademico hanno reso il viaggio più piacevole e stimolante.

Di cuore, Francesco.



## Bibliografia:

- [1] Claes G. Granqvist, Oxide electrochromics: An introduction to devices and materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 99, April 2012, Pages 1-13
- [2] C.G. Granqvist, P.C. Lansaker, N.R. Mlyuka, G.A. Niklasson, E. Avendano, Progress in chromogenics: New results for electrochromic and thermochromic materials and devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 93, February 2009, Pages 2032-2039
- [3] Ruben Baetens, Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen, Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Materials and Solar Cells*, Volume 94, 2010, Pages 87-105
- [4] <https://dullaartglas.nl/wp-content/uploads/2011/11/QUANTUM-GLASS-ELECTROCHROME-+-DULLAART1.pdf> . January 2011
- [5] Paladino and Company, Performance Assessment of SageGlass® Electrochromic Coatings and Control Scenarios. June 2010
- [6] C.G. Granqvist, Electrochromic tungsten oxide films: Review of progress 1993-1998, *Energy Materials and Solar Cells*, Volume 60, 2000, Pages 201-262
- [7] Wei Cheng, Marta Moreno-Gonzalez, Ke Hu, ..., David M. Weekes, Brian Tam, Curtis P. Berlinguette, Solution-Deposited Solid-State Electrochromic Windows. *iScience* 10, December 2018, pag. 81-86