

# PROTECCIÓN DE LA FACHADA DE VIDRIO: ESTRATEGIAS DE MEMBRANAS TEXTILES PARA EL DISEÑO EN ETAPAS TEMPRANAS PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE EDIFICIOS DE OFICINAS EN CLIMAS CÁLIDOS Y HÚMEDOS

Recibido 28/01/2026  
Aceptado 27/06/2026

## SHADING THE GLASS FAÇADE: TEXTILE MEMBRANE STRATEGIES FOR EARLY-STAGE DESIGN FOR OFFICE BUILDING ENERGY-EFFICIENCY IN HOT-HUMID CLIMATES

## SOMBREAMENTO DE FACHADAS DE VIDRO: ESTRATÉGIAS COM MEMBRANAS TÊXTEIS PARA O PROJETO INICIAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS EM CLIMAS QUENTES E ÚMIDOS

**Chandrasekaran Chockalingam** (Autor de Correspondencia)

Ph.D. in Fully Glazed Building Facades  
Professor, School of Architecture and Planning  
Vellore Institute of Technology  
Vellore, India  
<https://orcid.org/0000-0003-4215-0202>  
[chandrasekaran.c@vit.ac.in](mailto:chandrasekaran.c@vit.ac.in)

**Madhu Mathi Anbu**

Ph.D. in Building Thermal Performance  
Professor, Higher academic grade, School of Architecture and Planning  
Vellore Institute of Technology  
Vellore, India  
<https://orcid.org/0000-0002-7478-1183>  
[madhumathia@vit.ac.in](mailto:madhumathia@vit.ac.in)

**Mase Noguchi**

Ph.D. in Architecture and Sustainable built environment  
Associate Professor, Faculty of Architecture, Building and Planning  
The University of Melbourne  
Melbourne, Australia  
<https://orcid.org/0000-0003-1437-5455>  
[masa.noguchi@unimelb.edu.au](mailto:masa.noguchi@unimelb.edu.au)



## RESUMEN

En el clima cálido y húmedo de la India, la prevalencia de edificios de oficinas de varios pisos totalmente acristalados (FGM, por sus siglas en inglés) conduce a un mayor consumo energético, principalmente debido a la ganancia de calor solar a través de sus extensas superficies de vidrio. Aunque el sombreado exterior es una solución reconocida, los diseñadores a menudo carecen de claridad sobre qué tipo de sistema de sombreado y, en particular, qué material ofrece el mejor rendimiento en las etapas críticas del diseño inicial. Este estudio emplea un marco comparativo basado en simulaciones para evaluar la integración de membranas textiles sostenibles en tres configuraciones de sombreado distintas: pantalla solar fija, estructura fija tipo diagrid y sombreado dinámico. Utilizando un modelo representativo de un edificio de oficinas totalmente acristalado y de varios pisos ubicado en Chennai, la investigación empleó Autodesk Revit para el modelado, eQuest para el análisis energético y Dynamo para la configuración paramétrica, con el fin de realizar un análisis multiobjetivo. Los procedimientos incluyeron la cuantificación de las cargas anuales de enfriamiento para evaluar el rendimiento térmico, la medición de la iluminancia útil de luz diurna (UDI, por su sigla en inglés) para evaluar el confort visual, y el análisis del costo inicial de inversión de los dispositivos de sombreado integrados para determinar el período de retorno económico de cada sistema en comparación con un caso base sin sombreado. El análisis comparativo demuestra el potencial de un ahorro energético considerable en todas las opciones. Sin embargo, los resultados revelaron diferencias marcadas y tendencias contradictorias entre el rendimiento térmico y visual. En particular, la pantalla solar fija se mostró como la solución más eficaz, al equilibrar la reducción de la demanda energética con la viabilidad económica. El estudio concluye que las simulaciones orientadas por materiales son esenciales en la fase inicial del diseño para permitir la toma de decisiones bien fundamentadas que alineen la sostenibilidad con el rendimiento del edificio.

### Palabras clave

ahorro energético, fachada totalmente acristalada, sombreado con membrana textil, sombreado dinámico, luz diurna, cálido y húmedo

## ABSTRACT

In India's hot and humid climate, the prevalence of fully glazed multi-story (FGM) office structures results in higher energy use, primarily due to solar heat ingress through their extensive glass surfaces. While external shading is a well-known solution, designers often lack clarity on which shading type and, specifically, which material performs best during the critical early design stages. This study employs a simulation-based comparative framework to evaluate the integration of sustainable textile membranes across three distinct shading configurations: fixed solar screen, fixed diagrid, and dynamic shading. Using a representative, fully glazed, multi-storied office building model located in Chennai, the research employed Autodesk Revit for modeling, E-Quest for energy analysis, and Dynamo for parametric setup to conduct a multi-objective analysis. The procedures involved quantifying annual cooling loads to assess thermal performance, measuring Useful Daylight Illuminance (UDI) to evaluate visual comfort, and performing an Initial investment cost of the integrated shading devices to determine the economic payback period for each system compared to a non-shaded base case. Comparative analysis demonstrates the potential for considerable energy savings across all options. However, findings revealed pronounced disparities and contradictory trends between thermal and visual performance. Notably, the fixed solar screen emerged as the most effective solution, balancing energy reduction with economic viability. The study concludes that material-driven simulations are essential in the early design phase to enable well-informed choices that align sustainability with building performance.

### Keywords

energy saving, fully glazed façade, textile membrane shading, dynamic shading, day lighting, hot and humid

## RESUMO

No clima quente e úmido da Índia, a prevalência de edifícios de escritórios de múltiplos pavimentos totalmente envidraçados (FGM, do inglês fully glazed multi-storey) acarreta um maior consumo de energia, sobretudo devido ao ganho de calor solar por meio de suas extensas superfícies de vidro. Embora o sombreamento externo seja uma solução amplamente conhecida, os projetistas frequentemente carecem de clareza quanto ao tipo de sombreamento e, especificamente, ao material com melhor desempenho nas fases iniciais de projeto, que são críticas. Este estudo emprega uma estrutura comparativa baseada em simulação para avaliar a incorporação de membranas têxteis sustentáveis em três configurações distintas de sombreamento: tela de proteção solar fixa, malha diagonal (diagrid) fixa e sombreamento dinâmico. A partir de um modelo representativo de um edifício de escritórios de múltiplos pavimentos totalmente envidraçado localizado em Chennai, a pesquisa utilizou o Autodesk Revit para a modelagem, o eQuest para a análise energética e o Dynamo para a configuração paramétrica, conduzindo uma análise multiobjetivo. Os procedimentos envolveram a quantificação das cargas anuais de resfriamento para avaliar o desempenho térmico, a medição da Iluminância Útil de Luz Natural (UDI, do inglês Useful Daylight Illuminance) para avaliar o conforto visual e o levantamento do custo de investimento inicial dos dispositivos de sombreamento incorporados, a fim de determinar o período de retorno econômico de cada sistema em comparação com um caso base sem sombreamento. A análise comparativa demonstra o potencial de economias de energia consideráveis em todas as alternativas. Contudo, os resultados revelaram disparidades acentuadas e tendências contraditórias entre os desempenhos térmicos e visuais. Destaca-se que a tela de proteção solar fixa mostrou-se a solução mais eficaz, equilibrando a redução do consumo de energia com a viabilidade econômica. O estudo conclui que simulações orientadas pelo material são essenciais na fase inicial de projeto para viabilizar escolhas bem fundamentadas que conciliem sustentabilidade e desempenho da edificação.

### Palavras-chave

economia de energia, fachada totalmente envidraçada, sombreamento por membrana têxtil, sombreamento dinâmico, iluminação natural, ambiente quente e úmido

## LISTA DE ABREVIATURAS

AES: Ahorro anual de energía por m<sup>2</sup> de área de piso de oficina para enfriamiento de espacios  
ASE: Exposición anual al sol  
API: Interfaz de programación de aplicaciones.  
BIM: Modelo de información de construcción  
DOE-2: Software del Departamento de Energía de EE.UU. para uso energético.  
ECBC 17: Código de Construcción de Conservación de Energía, Versión 2017  
EEM: Medidas de eficiencia energética en E-Quest.  
ESD: Dispositivo de sombreado exterior  
FGM: Completamente acristalado de varios pisos.  
GRIHA V19: Calificación ecológica para la evaluación integrada del hábitat, versión 2019  
HVAC: Calefacción, ventilación y enfriamiento  
IIC: Costo de inversión inicial por metro cuadrado del área de la oficina  
TI: Tecnología de la información  
LEED: Liderazgo en energía y diseño ambiental  
P & C: Métodos de recorte de polígonos  
PTFE: Politetrafluoroetileno  
PES: Hilos de poliéster  
PVC: Cloruro de polivinilo  
SCL: Carga de enfriamiento del espacio  
SHGC: Coeficiente de ganancia de calor solar.  
TNEB: Junta de Electricidad de Tamil Nadu.  
UDI: Iluminancia útil de la luz del día  
USD: Dólar estadounidense  
VLT: Transmitancia visual de la luz  
WWR: Relación ventana-pared

## INTRODUCCIÓN

Los edificios comerciales con exteriores completamente acristalados maximizan la luz natural y la estética contemporánea, pero consumen más del doble de energía que sus contrapartes internacionales en India debido a la falta de capacidad de respuesta climática (Consejo de Defensa de Recursos Naturales [NRDC] y Colegio de Personal Administrativo de India [ASCI], 2014). En el clima cálido y húmedo de Chennai (13.0827 N, 80.2707 E), las temperaturas diurnas requieren aire acondicionado constante durante todo el año. Implementar un sombreado exterior efectivo basado en la orientación puede reducir significativamente las cargas de enfriamiento en estas fachadas altamente acristaladas (Chi et al., 2018), lo que demuestra que es mucho más eficiente que el uso de persianas internas (Arumugam y Ramalingam, 2024). Fundamentalmente, el 80% del rendimiento energético a lo largo del ciclo de vida de un edificio se determina en la etapa inicial de diseño, por lo que la integración temprana de datos específicos del acristalamiento y del sombreado del material resulta vital (Hwang y Chen, 2022; Bhatia et al., 2024). Entre las alternativas, las membranas textiles arquitectónicas permiten geometrías estructuralmente viables, rentables y complejas de forma libre. Protegen a las estructuras de la radiación UV y del clima más severo (São João, Carvalho y Figueiro, 2016) mientras que su ligereza, transparencia y alta reflectividad solar minimizan la absorción de calor solar (Tian et al., 2020).

En las regiones tropicales, la protección solar adaptativa equilibra la eficiencia visual y térmica en todas las estaciones. El diseño de estos sistemas inteligentes y dinámicos requiere una ingeniería interdisciplinaria compleja (Al-Masrani y Al-Obaidi, 2019), como lo ejemplifican las torres Al-Bahar de Abu Dhabi, que utilizan paraguas plegables de tela de PTFE

translúcida, inspirados en la mashrabiya tradicional. Sin embargo, el conocimiento actual sobre las membranas textiles para fachadas sigue fragmentado, con aplicaciones concentradas en Oriente Medio y rara vez implementadas en los trópicos. Este estudio busca cerrar esa brecha comparando una pantalla solar, un diagrid y un sistema de sombreado dinámico, todos con la membrana textil más reciente, para determinar la mayor eficiencia energética, el confort visual óptimo y la inversión inicial más rentable para estructuras de oficinas de varios pisos completamente acristaladas en Chennai.

## MEMBRANAS TEXTILES PARA PROTECCIÓN SOLAR DE FACHADAS

Los materiales de membrana son cada vez más populares por su atractivo estético y su uso práctico como envolventes ultraligeras o como revestimiento de fachadas en remodelaciones de edificios (Al-Masrani y Al-Obaidi, 2019). Estas membranas ofrecen eficiencia ambiental, diseño orgánico, alta adaptabilidad, semitransparencia, instalación rápida y mantenimiento mínimo. Fabricados mediante el recubrimiento de estructuras fibrosas sintéticas de alto rendimiento con nuevos polímeros, estos compuestos exhiben durabilidad, hidrofobicidad, resistencia a la llama y a la radiación UV, así como una capacidad de carga y una resistencia al desgarrar excepcionales (Nurazzi et al., 2021).

Comúnmente utilizados para la protección solar y las envolventes arquitectónicas, estos diversos diseños de malla mantienen la visibilidad bidireccional y crean efectos artísticos en las estructuras de vidrio (Procaccini et al., 2024). Por lo general, consisten en hilos de poliéster (PES) recubiertos con cloruro de polivinilo (PVC) o en hebras de fibra de vidrio recubiertas con politetrafluoroetileno (PTFE) o con silicona. Disponibles en varios tonos, resistencias e impresiones personalizables, estas pantallas de tela proporcionan un aislamiento térmico rentable y de alto rendimiento (Comitti et al., 2024). Las membranas de vidrio/PTFE son las más duraderas; a menudo duran más de 30 años debido a su resistencia a la intemperie (Wang et al., 2022), mientras que las membranas de PVC son menos resistentes y duran entre 10 y 15 años con alta exposición a los rayos UV (São João, Carvalho, & Figueiro, 2016). La investigación en curso cuenta con el apoyo de TensiNet (s. f.) y de la iniciativa COST Action TU 1303 (Mollaert et al., 2017).

Serge Ferrari desarrolló Frontside View 381 (Serge Ferrari Group, n. d. b), una membrana reciclable de hilo de PSA recubierta con PVC. Se ha utilizado para la estética y el control del clima en renovaciones como la del Hotel Oasis y en la modernización del edificio Westraven de 2008 en Utrecht. Ligeras y translúcidas, estas membranas están integradas en fachadas cinéticas para responder dinámicamente a la altitud del sol. Aunque está disponible en la India, se utiliza principalmente por motivos estéticos más que por eficiencia energética. Sin embargo, en climas más cálidos, Frontside View 381 reduce significativamente la ganancia de calor solar y el consumo de energía (Ciampi et al., 2022).

Este estudio utiliza Frontside View 381 de Serge Ferrari para sistemas de sombreado fijos y dinámicos. La literatura existente

confirma que el sombreado dinámico no se ha evaluado frente a sistemas fijos (como aletas diagrid y pantallas) en climas cálidos y húmedos. Además, aunque los materiales de sombreado exterior afectan significativamente el rendimiento de las fachadas altamente acristaladas, existen datos limitados sobre cómo el sombreado dinámico, el diagrid o las pantallas influyen en el rendimiento energético y en la luz diurna de los edificios acristalados en climas cálidos y húmedos como el de Chennai.

## METODOLOGÍA

Este estudio emplea un flujo de trabajo paramétrico basado en simulación para evaluar los sistemas de sombreado externos de un edificio de oficinas de varios pisos, completamente acristalado (MGF), en el clima cálido y húmedo de Chennai. La metodología integra análisis de energía, simulación de luz diurna y modelado computacional en un entorno digital unificado para una evaluación comparativa.

- Desarrollo del modelo base

Un edificio de oficinas representativo, completamente acristalado, se modeló en Autodesk Revit según las tipologías típicas de oficinas contemporáneas (placas de piso estándar, proporciones de acristalamiento, horarios de ocupación y propiedades de los materiales). El edificio sin sombrear sirve como caso base de referencia. Los datos de EnergyPlus Weather (EPW) de Chennai se integraron para simular con precisión los niveles locales de radiación solar, temperatura y humedad.

- Modelado de sistemas de sombreado

Se aplicaron tres tipologías de sombreado externo a la geometría de la fachada base:

- Aletas diagrid (miembros estructurales angulados)
- Sistema de pantalla solar (membranas textiles perforadas paralelas a la fachada)
- Sistema de sombreado dinámico (paneles cinéticos móviles con relaciones de apertura ajustables)

Para aislar los efectos de la geometría y el comportamiento operativo, los tres sistemas utilizaron la misma membrana textil de Serge Ferrari, Frontside View 381.

- Control paramétrico mediante Dynamo

Las configuraciones de sombreado dinámico se desarrollaron de forma paramétrica en Revit mediante Dynamo (s. f.). Los comandos personalizados calcularon vectores solares en función de la orientación de la fachada, la fecha y la hora, lo que permitió a los paneles cinéticos ajustar dinámicamente sus relaciones de apertura en respuesta a la exposición solar en tiempo real.

- Simulación de energía

El rendimiento térmico se analizó con E-Quest. El modelo Revit se exportó y calibró con parámetros operativos idénticos (configuraciones de HVAC, horarios de ocupación, cargas de iluminación y características de acristalamiento). El consumo anual de energía de enfriamiento de cada sistema se comparó

con el caso base para calcular el porcentaje de reducción de la demanda de refrigeración.

- Análisis de luz diurna

El confort visual y la disponibilidad de luz diurna en interiores se evaluaron mediante Autodesk Insight, midiendo específicamente la iluminancia diurna útil (UDI). Este paso aseguró que minimizar la ganancia de calor solar no comprometiera inadvertidamente la penetración necesaria de la luz diurna en interiores.

- Evaluación económica y marco comparativo

Se estimaron los costos de inversión iniciales (fabricación, materiales e instalación) para cada sistema. Luego, se calcularon los periodos de recuperación de la inversión utilizando los ahorros anuales simulados en costos de energía para evaluar la viabilidad financiera a largo plazo. Para garantizar una comparación justa, todas las simulaciones utilizaron condiciones de contorno y periodos de análisis idénticos, aislando la geometría y el comportamiento del sistema como variables principales de rendimiento.

En general, la metodología combina el modelado paramétrico, la simulación de rendimiento y el análisis económico para ofrecer una evaluación integral de las estrategias de sombreado. La integración de herramientas como Revit, Dynamo, E-Quest e Insight permite un flujo de trabajo replicable y escalable para optimizar el diseño en la etapa inicial de la arquitectura sensible al clima. El diagrama de flujo de la metodología general se muestra en la Figura 1.

## CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN

### CONTEXTO CLIMÁTICO DE CHENNAI, INDIA

Chennai, situada a 13.0827° de latitud norte y 80.2707° de longitud este, tiene un clima cálido y húmedo. La posición de la ciudad en el ecuador térmico y en la costa evita fluctuaciones estacionales drásticas de la temperatura. El periodo más cálido se extiende desde finales de mayo hasta principios de junio, con temperaturas máximas que oscilan entre 37 °C y 41 °C. Enero es la época más fresca, con temperaturas que oscilan entre 19 °C y 25 °C.

### La membrana de sombreado de muestras seleccionada

Front View 381-3109, fabricada por Serge Ferrari Group (n. d. a), es una tela de poliéster recubierta de PVC de primera calidad con una estructura abierta que se pretensiona durante el recubrimiento (SA Industries BEC, 2014). La Tabla 1 presenta un resumen de las especificaciones técnicas del fabricante. Los datos disponibles sobre transmisión y reflexión se basan en mediciones realizadas a incidencia normal, sin considerar ángulos distintos de la normal.

### Herramientas de simulación

Este estudio utiliza herramientas de simulación rápidas y sencillas en la fase inicial de diseño para identificar la solución de sombreado óptima. El flujo de trabajo emplea E-quest

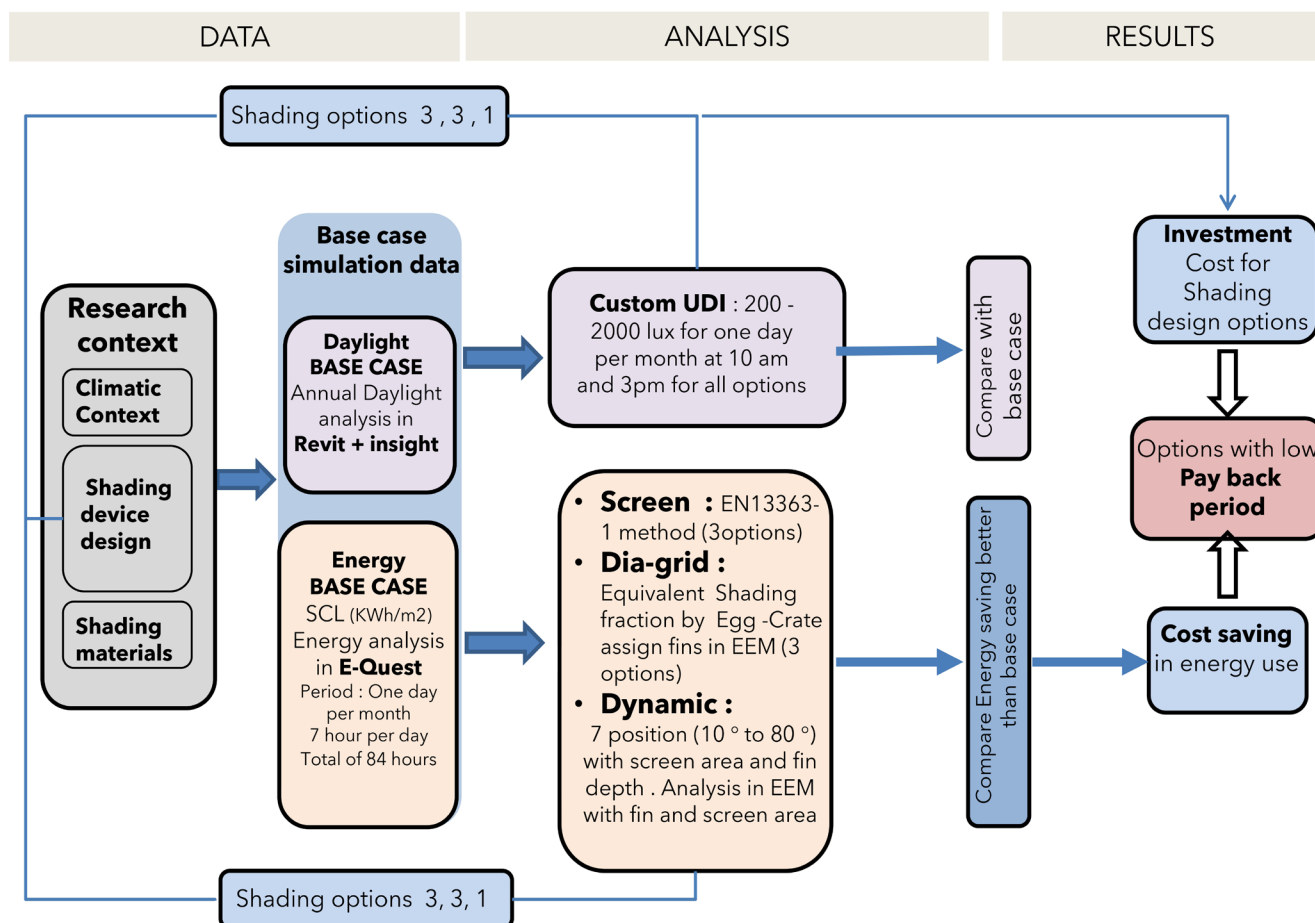


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: Preparación por los autores.

| Propiedad material                           | Valor/especificaciones        | Imagen de la aplicación                                                              | Imagen de la muestra                                                                  |
|----------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Color                                        | Amarillo ceniza-381-3109      |  |  |
| Material                                     | Poliéster recubierto de PVC   |                                                                                      |                                                                                       |
| Hilados                                      | 1100 Dtex PET HT              |                                                                                      |                                                                                       |
| Peso                                         | 600 gramos/m2                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Grosor                                       | 1,1 milímetros                |                                                                                      |                                                                                       |
| Resistencia a la tracción (envoltura/ trama) | 330/330 daN/5cm               |                                                                                      |                                                                                       |
| Resistencia al desgarro (envoltura/ trama)   | 65/65 daN/5cm                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Resistencia a la temperatura                 | - 30 ° a 70 °                 |                                                                                      |                                                                                       |
| Retardancia de llama                         | Euroclass B-s2, do/EN 13501-1 |                                                                                      |                                                                                       |
| Transmisión térmica (Ts) %                   | 29                            |                                                                                      |                                                                                       |
| Reflexión térmica (Rs) %                     | 36                            |                                                                                      |                                                                                       |
| Absorción térmica (As) %                     | 35                            |                                                                                      |                                                                                       |
| Transmisión visual (Tv) %                    | 29                            |                                                                                      |                                                                                       |

Tabla 1. Especificación técnica de Front View 381-3109. Fuente: Serge Ferrari Group, (n.d.b).

para el modelado de energía, junto con Revit + Dynamo para la geometría de construcción, el análisis de iluminación y los cálculos de ángulos de sombra e incidencia.

- *E-Quest*: Derivado de DOE-2, este software orientado al usuario proporciona características térmicas dinámicas por hora para analizar la transferencia de calor en la envolvente del edificio y ofrece resultados de nivel profesional con una entrada mínima (Barozzi et al., 2016). Incorpora medidas de eficiencia energética (EME) como subsimulación del modelo base. Este estudio utiliza el asistente de diseño detallado para calcular la carga de enfriamiento del espacio (SCL) y la energía de enfriamiento horaria y anual (kWh) extraída del serpentín de enfriamiento, lo que representa un uso energético importante en climas cálidos como el de Chennai.
- *Revit + Insight*: Revit define la geometría del edificio, mientras que Insight actúa como un complemento integrado para simular la luz del día en función de la geometría, los espacios, la ubicación y los componentes definidos.
- *Dynamo*: Dynamo, una aplicación de programación visual en Revit, utiliza un método computacional basado en nodos para codificar el flujo de trabajo de diseño. En este estudio, la geometría del dispositivo de sombreado se importa a Dynamo para calcular la fracción de sombreado (porcentaje del panel acristalado sombreado) en momentos y orientaciones específicos.

## DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS DE SOMBREADO

### PANTALLAS SOLARES FIJAS

Las pantallas perforadas ofrecen beneficios visuales para un diseño minimalista frente a las aletas o las persianas salientes. Su efectividad depende del material, la relación de perforación, la profundidad, la geometría y la ubicación, así como de elementos arquitectónicos tradicionales que mejoran aún más el confort térmico en climas cálidos (Alhmoud y Alhmoud, 2024). Este estudio posiciona una pantalla plana a 20 cm del plano de acristalamiento. El panel cortina base mide 4 m x 2 m y tiene una altura de suelo de 4 m. La pantalla cubre la parte superior e inferior del panel, dejando un espacio de visualización central. El área de la pantalla varía en tres configuraciones: 60%, 80% y 100% (Figura 2).

### ALETAS DIAGRID FIJAS

Diagrids, que surgieron en la construcción moderna de acero alrededor de 2003, emplean refuerzos diagonales en soportes exteriores enmarcados (Brake, 2011). Este sistema de sombreado diagonal de cajas de huevos gestiona eficazmente la captación de luz diurna, el control del deslumbramiento y la visibilidad hacia el exterior. Esta investigación emplea una rejilla de 4 m x 4 m colocada a 20 cm del panel acristalado, con profundidades de aleta de 400, 500 y 600 mm. Las aletas diagonales se colocan a nivel del piso y en el centro de la rejilla del panel (Figura 3).

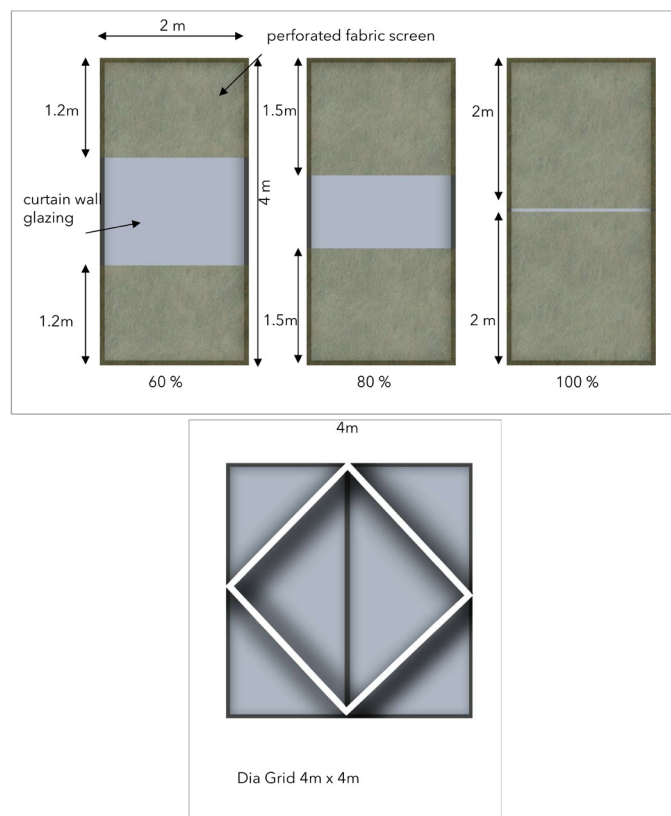


Figura 2. Opciones de pantalla solar: 60%, 80% y 100% del área del panel de acristalamiento y de la vista frontal del diagrid. Fuente: Preparación por los autores.

### DISPOSITIVO DE SOMBREADO DINÁMICO

Los sistemas de sombreado dinámico mejoran la comodidad de los ocupantes al adaptarse en tiempo real a las condiciones ambientales (Sorooshnia et al., 2023). Los mecanismos de rotación cinética y de plegado pueden reducir las demandas de energía de enfriamiento e iluminación entre un 19% y un 24% en las regiones tropicales (Shi, Tablada y Wang, 2020). Este estudio utiliza una pantalla solar dinámica con perforaciones y un mecanismo de plegado tipo paraguas. Operado por un pistón neumático central, el dispositivo se extiende o se retrae de manera similar a la del sistema de la torre Al-Bahr. El panel de 4 m x 4 m contiene cuatro brazos diagonales que se pliegan en siete etapas (Figura 3). Modelado en Revit mediante una familia de paneles de cortina basados en patrones, el sistema se abre o se cierra al ajustar la altura del eje central. Las siete etapas operativas varían de 20° a 80° a intervalos de 10°.

## DESEMPEÑO ENERGÉTICO

Las simulaciones energéticas anuales se realizaron utilizando un modelo estándar de oficina de planta abierta de un piso, consistente con los utilizados en investigaciones anteriores (Thalfeldt, Kurnitski y Voll, 2015). Los tres tipos de dispositivos de sombreado se aplican sólo a las orientaciones este, oeste y sur. Esta investigación no consideró el ángulo de las aletas, las propiedades térmicas del material de sombreado ni la transmitancia solar a través de este.

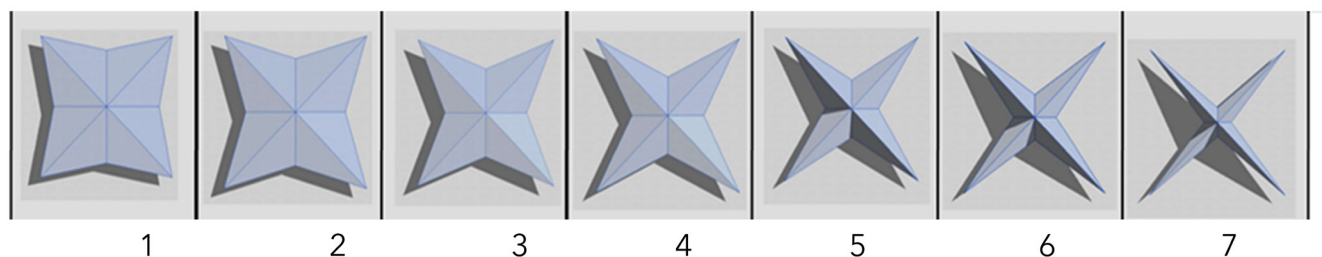


Figura 3. Imagen de la geometría de sombreado dinámico y de 7 etapas de plegado. Fuente: Preparación por los autores.

### PERÍODO DE ANÁLISIS

- Un día al mes: la fecha utilizada para la simulación es el día 21 de cada mes (Coakley et al., 2014). Como el sombreado dinámico se basa en datos horarios, sería complejo considerar todos los días del año en el análisis. Los datos de un día por mes se recopilan para obtener los resultados anuales.
- Horas de análisis de sombreado: para evaluar la influencia del diseño de sombreado en la energía, se toman entre las 10:00 y las 16:00, ya que son las horas pico de radiación solar en el plano de la fachada.

Cubre 12 días a 7 horas diarias, lo que suma 84 horas de las 2880 horas diurnas.

### MODELO DE ENERGÍA DEL CASO BASE

Según los hallazgos de investigaciones previas, es necesario un elemento de sombreado para un piso típico en Chennai, donde la superficie acristalada supera el 25% de la superficie de la oficina (Chockalingam, 2021). El modelo del caso base se crea en E-Quest con más del 25% del área de acristalamiento de la oficina. El edificio de oficinas es un bloque rectangular de 30 m x 45 m, con el lado más largo orientado de este a oeste y una altura de 60 metros. El edificio fue construido con 15 pisos y una altura entre pisos de 4 m. La simulación se ejecutó en modo multiplicador de piso para los pisos intermedios (entre la planta baja y el piso superior). La superficie total construida es de 13.500 m<sup>2</sup> y el área total de oficinas con aire acondicionado es de 10.800 m<sup>2</sup>. Cada piso estándar tiene 1350 m<sup>2</sup>, con un área de oficinas de 1080 m<sup>2</sup> en cada piso, cuatro zonas por orientación y un área central sin aire acondicionado, como se muestra en la Figura 4.

Los siguientes son los supuestos para el análisis energético basados en datos predeterminados y en estudios de casos (Chockalingam, 2021):

- Ubicación y clima : Chennai y datos meteorológicos\*. Archivo E.P.W.
- Proyección norte : Norte verdadero
- Planificación de espacios de oficina/zonas de actividad : 50% de plan de oficina abierta, con 25% de cubículos, 10% de pasillos, 5% de vestíbulo y 10% de servicios públicos.
- Altura de piso a piso : 4 metros
- Altura del suelo al cielo falso : 3 metros
- Patrón de zonificación : perímetro y área central
- Zonas con A/C: el área de la oficina tiene un 80% con aire acondicionado y un 20% de área central sin aire acondicionado
- Tasa de ocupación : 12,5 personas por metro cuadrado
- Horario de ocupación : de 9:00 a 18:00 y 6 días a la semana.
- Muros : bloque A.A. de 150 mm sin aislación.
- Acristalamiento : individual transparente teñido de gris de 6 mm de grosor en una estructura de aluminio

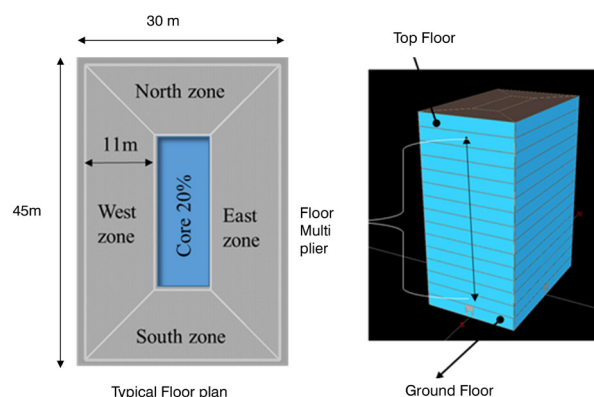


Figura 4. Modelo de caso base en E-Quest. Fuente: Preparación por los autores.

- Acristalamiento no 1205 según DOE glass
- Biblioteca con SHGC : 0,59
- Transmitancia visual : 0,43
- % relación ventana-pared : 95% en todas las orientaciones.
- Tamaño de la ventana : 2 m x 4 m.
- Carga de iluminación : 1 vatio / m<sup>2</sup>
- Carga de potencia : 2 watts/m<sup>2</sup>
- Punto de ajuste de enfriamiento : 23,3 °C
- Tipo HVAC : VAV con sistema de agua fría por piso.
- Temperatura del aire de suministro : 12 °C
- Humedad relativa (HR) : 50%
- Ganancia de calor latente por persona : 58 W
- Ganancia de calor sensible por persona : 73 W

El modelo del caso base de energía se crea mediante un asistente de diseño detallado para obtener resultados de SCL y EUI por hora. Los resultados simulados para cada hora del día suman un total de 3000 horas (de 9:00 a 18:00, 6 días a la semana, con una densidad de SCL de 96,5 kWh/m<sup>2</sup> y un EUI de 219 kWh/m<sup>2</sup>).

### ANÁLISIS DE ENERGÍA PARA PANTALLA DE TELA SOLAR

La norma EN 13363-1 ofrece un enfoque sencillo para evaluar el SHGC del acristalamiento de fachadas. Los hallazgos de laboratorio demuestran una reducción del SHGC en tipos específicos de acristalamiento cuando se combinan con pantallas solares específicas. En E-quest, los componentes de fachada de medida de eficiencia energética (EEM) se crean incorporando un tipo de acristalamiento adicional con un valor SHGC más bajo, según lo

| Descripción                                  | Valor | Unidades |
|----------------------------------------------|-------|----------|
| Stg (transmitancia solar de acristalamiento) | 0,46  |          |
| St (transmitancia solar de la tela)          | 0,29  |          |
| g (SHGC de vidrio)                           | 0,59  |          |
| Sa (absorbancia solar de la tela)            | 0,35  |          |
| Ug - factor U de acristalamiento             | 1,19  | w/m2     |
| G                                            | 1,14  | w/m2     |
| G2                                           | 10    | w/m2     |
| G1                                           | 5     | w/m2     |
| g tot                                        | 0,23  |          |
| No. acristalamiento igual a gtot             | 1403  |          |

Tabla 2. Método EN 13363-1 para el acristalamiento seleccionado y valor SHGC revisado según las ecuaciones. Fuente: Preparación por los autores.

establecido en el método EN13363-1 (Carletti et al., 2014). Para determinar el SHGC ajustado del vidrio tintado simple elegido de la biblioteca de vidrio del DOE, específicamente el no. 1205 (SHGC = 0,59) (Lawrence Berkeley National Laboratory – James J. Hirsch & Associates, 2009), se deben usar la Ecuación 1 y Ecuación 2.

$$g_{tot} = S_{tg} + S_a (G/G_2) + St ((1 - g) G/G_1)$$

(Ecuación 1)

Donde  $g_{tot}$  es el SHGC revisado agregando una pantalla exterior sobre el acristalamiento,  $S_{tg}$  es la transmitancia solar del acristalamiento,  $S_t$  es el valor de transmitancia solar de la pantalla,  $S_a$  es la absorbancia solar de la pantalla,  $G_1$  y  $G_2$  son valores fijos definidos por los estándares,  $g$  es el SHGC del acristalamiento y  $G$  se deriva de la Ecuación 2.

$$G = (1/U_g) + (1/G_1) + (1/G_2)$$

(Ecuación 2)

Donde  $U_g$  es el valor U del acristalamiento. El área de la pantalla solar se revisa en el modelo del caso base para incluir otro tipo de vidrio con un SHGC de 0,23, según la biblioteca de vidrio DOE no. 1405. En la EEM del modelo del caso base en E-Quest, el acristalamiento de la ventana se reemplaza por una pantalla solar (60% del área de la pantalla), como se muestra en la Figura 2. Las 84 horas del período de análisis se comparan con el caso base en la Tabla 2.

## ANÁLISIS DE ENERGÍA PARA EL DISPOSITIVO DE SOMBREADO DIAGRID

En E-Quest no se pueden crear aletas complejas como la caja diagonal de huevos. Por lo tanto, hemos creado aletas horizontales y verticales equivalentes basadas en la fracción de sombra de las aletas diagrid. El comando Dynamo se usa para calcular el área de sombra mediante el método P & C (Murta, 2015) para diagrid, como se muestra en la

Figura 2, y la profundidad equivalente de la aleta de la caja de huevos, como se muestra en la Tabla 3. En E-Quest se creó el sombreado de ventanas usando la tabla y se ejecutó EEM para obtener el consumo de energía de enfriamiento del espacio.

## ANÁLISIS DE ENERGÍA PARA EL DISPOSITIVO DE SOMBREADO DINÁMICO

El dispositivo de sombreado dinámico combina aletas y una pantalla que se transforma según el ángulo del sol. El comando de Dynamo calcula el ángulo solar de los paneles de sombreado y el ángulo abierto correspondiente. Para simplificar, se tomaron solo 7 posiciones, que oscilaban entre 10° y 80° en intervalos de 10°. Mediante los cálculos geométricos de las elevaciones, se puede determinar el área de la pantalla y la profundidad de las aletas para cada paso, como se muestra en la Tabla 5. Los cálculos de esta información se realizan durante el período de análisis de 84 horas. Para cada hora, el modelo de caso base se actualiza con una profundidad de aleta específica revisada y un área de pantalla, como en la simulación EEM. Posteriormente, se suman y se evalúan los resultados de 84 simulaciones de EEM en comparación con el caso base para el mismo período de análisis. El ahorro de energía supera el de los sin sombreado en todos los tipos de dispositivos con sombreado, como se muestra en la Figura 6.

Como se ilustra en la Tabla 4, se presenta el ángulo incidental calculado para cada hora y orientación del 21 de marzo. Con base en esto, se asignaron los pasos del dispositivo dinámico y se asignaron su % de relación ventana-pared y su profundidad de aleta equivalentes en las ejecuciones de EEM. Por ejemplo, en la etapa 1, el % de la relación ventana-pared es 20 y la profundidad de la aleta en el cálculo del área de sombra es 400 mm, n.º 2, como se muestra en la Tabla 5. Y para la etapa 7, la relación ventana-pared es del 80% con una profundidad de aleta de 200 mm (n.º 2), como se muestra en la Tabla 4. La trayectoria del sol, el vector del sol y el ángulo incidente del comando de cálculo del panel dinámico en Dynamo se muestran en la Figura 5.

| DIAGRID 4m x 4m  | Hora  | Orientación | SF% diagrid |      |      | SF% aleta equivalente |      |      |
|------------------|-------|-------------|-------------|------|------|-----------------------|------|------|
|                  |       |             | 600         | 500  | 400  | 800                   | 660  | 520  |
| 21 de marzo      | 11:00 | Este        | 55          | 47   | 37   | 52                    | 44   | 33   |
|                  | 15:00 | Oeste       | 42          | 35   | 28   | 40                    | 34   | 25   |
|                  | 11:00 | Sur         | 72          | 60   | 48   | 74                    | 62   | 46   |
|                  | 15:00 | Sur         | 72          | 60   | 48   | 82                    | 69   | 51   |
| 21 de junio      | 11:00 | Este        | 70          | 59   | 47   | 49                    | 41   | 31   |
|                  | 15:00 | Oeste       | 49          | 41   | 33   | 35                    | 30   | 22   |
| 21 de septiembre | 11:00 | Este        | 65          | 54   | 43   | 61                    | 52   | 38   |
|                  | 15:00 | Oeste       | 37          | 31   | 25   | 35                    | 29   | 22   |
|                  | 11:00 | Sur         | 73          | 61   | 49   | 71                    | 66   | 44   |
|                  | 15:00 | Sur         | 73          | 61   | 49   | 88                    | 74   | 55   |
| 21 de diciembre  | 11:00 | Este        | 55          | 46   | 37   | 69                    | 58   | 43   |
|                  | 15:00 | Oeste       | 37          | 31   | 25   | 45                    | 38   | 28   |
|                  | 11:00 | Sur         | 27          | 22   | 18   | 29                    | 24   | 18   |
|                  | 15:00 | Sur         | 24          | 20   | 16   | 32                    | 27   | 20   |
| TOTAL            |       |             | 751         | 628  | 503  | 762                   | 648  | 476  |
| Promedio         |       |             | 53,6        | 44,9 | 35,9 | 54,4                  | 46,3 | 34,0 |

Tabla 3. Tabla de profundidad H F. y V.F. equivalentes según SF% de las opciones de diagrid. Fuente: Preparación por los autores.

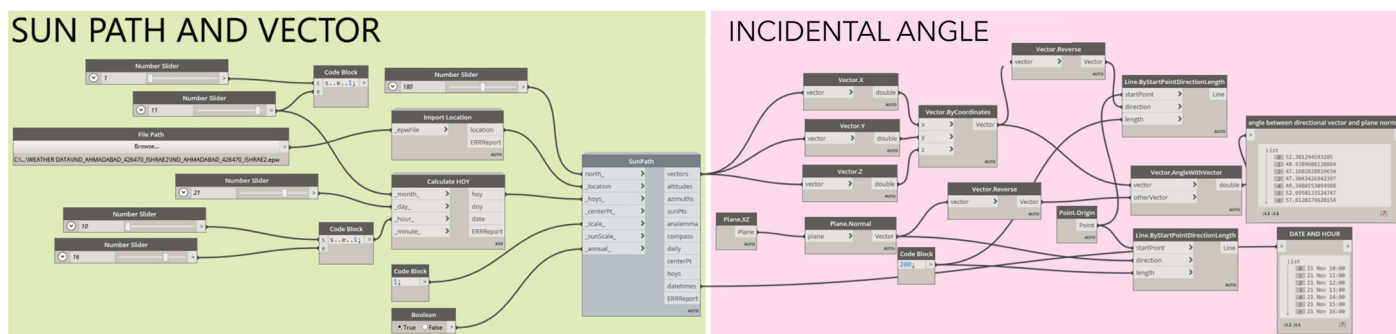


Figura 5. Trayectoria solar, vector solar y ángulo de incidencia del comando de cálculo del panel dinámico en Dynamo. Fuente: Preparación por los autores.

| 21 de marzo  | Hora - Número de paso del dispositivo dinámico |      |      |     |     |     |     |
|--------------|------------------------------------------------|------|------|-----|-----|-----|-----|
|              | 10am                                           | 11am | 12pm | 1pm | 2pm | 3pm | 4pm |
| Este / Oeste | 42                                             | 27   | 0    | 4   | 19  | 24  | 49  |
| Sur          | 17                                             | 21   | 23   | 23  | 22  | 19  | 15  |
| Este / Oeste | 5                                              | 3    | 1    | 1   | 2   | 3   | 5   |
| Sur          | 2                                              | 3    | 3    | 3   | 3   | 2   | 2   |

Tabla 4. Ángulo incidente del 21 de marzo y número de paso del dispositivo de sombreado dinámico para cada hora y orientación. Fuente: Preparación por los autores.

| Etapa | Imagen | Descripción            | Valores  | Vista de planta | Vista de la zona de aletas | vista del área de la pantalla |
|-------|--------|------------------------|----------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1     |        | Etapa                  | 8        |                 |                            |                               |
|       |        | Relación ventana-pared | 20%      |                 |                            |                               |
|       |        | Proyección             | 650      |                 |                            |                               |
|       |        | G2                     | 400 x 2  |                 |                            |                               |
|       |        | Prof. HF/VF            | 375      |                 |                            |                               |
| 2     |        | Etapa                  | 7        |                 |                            |                               |
|       |        | Relación ventana-pared | 30%      |                 |                            |                               |
|       |        | Proyección             | 630      |                 |                            |                               |
|       |        | G2                     | 600 x 2  |                 |                            |                               |
|       |        | Prof. HF/VF            | 315      |                 |                            |                               |
| 3     |        | Etapa                  | 6        |                 |                            |                               |
|       |        | Relación ventana-pared | 40%      |                 |                            |                               |
|       |        | Proyección             | 610      |                 |                            |                               |
|       |        | G2                     | 800 x 2  |                 |                            |                               |
|       |        | Prof. HF/VF            | 305      |                 |                            |                               |
| 4     |        | Etapa                  | 5        |                 |                            |                               |
|       |        | Relación ventana-pared | 50%      |                 |                            |                               |
|       |        | Proyección             | 575      |                 |                            |                               |
|       |        | G2                     | 1000 x 2 |                 |                            |                               |
|       |        | Prof. HF/VF            | 287      |                 |                            |                               |
| 5     |        | Etapa                  | 4        |                 |                            |                               |
|       |        | Relación ventana-pared | 60%      |                 |                            |                               |
|       |        | Proyección             | 532      |                 |                            |                               |
|       |        | G2                     | 1200 x 2 |                 |                            |                               |
|       |        | Prof. HF/VF            | 266      |                 |                            |                               |
| 6     |        | Etapa                  | 3        |                 |                            |                               |
|       |        | Relación ventana-pared | 70%      |                 |                            |                               |
|       |        | Proyección             | 475      |                 |                            |                               |
|       |        | G2                     | 1400 x 2 |                 |                            |                               |
|       |        | Prof. HF/VF            | 237      |                 |                            |                               |
| 7     |        | Stage                  | 2        |                 |                            |                               |
|       |        | WWR                    | 80%      |                 |                            |                               |
|       |        | Projection             | 400      |                 |                            |                               |
|       |        | G2                     | 1600 x 2 |                 |                            |                               |
|       |        | HF/VF dep              | 200      |                 |                            |                               |

Tabla 5. Los 7 pasos del dispositivo de sombreado dinámico y su respectiva profundidad de aleta y porcentaje de área de pantalla para las ejecuciones E.E.M. de E-Quest. Fuente: Preparación por los autores.

## OBSERVACIONES

1. La energía ahorrada por la pantalla solar es la más alta para los dispositivos de sombreado, seguida de las opciones dinámica y diagrid, como se muestra en la Figura 6
2. El ahorro de energía de la pantalla solar del 60% del área acristalada es casi igual al sombreado dinámico del 50% del área acristalada, como se muestra en la Figura 6
3. El mayor ahorro de energía se obtiene con el área de la pantalla más que con la profundidad de la aleta diagrid, como se muestra en la Figura 6.

## RENDIMIENTO DE LA LUZ DIURNA

Los análisis anuales de la luz diurna se realizaron mediante un modelo de oficina de planta abierta para cada tipo de dispositivo de sombreado. Las propiedades visuales y ópticas de la tela se especificaron en el modelo de Revit, con una transmitancia de luz visible (VLT) del 29%. El análisis de la luz diurna se realizó mediante el complemento Insight de análisis de iluminación para Revit. Se empleó la iluminancia diurna útil (UDI) como métrica; el análisis se realizó el 21 de cada mes (García-Martín et al., 2025), ya que el sombreado dinámico utiliza datos horarios. El rendimiento del sombreado se evaluó a las 10:00 y a las 15:00. (Ahmed, 2021), 10:00 para el este, 15:00 para el oeste y, en ambas, para las orientaciones sur. El análisis se adhirió a un rango umbral de 200-2000 lux según la ECBC (NRDC y ASCI, 2017), abarcando 24 horas de un total de 2880 horas de ocupación.

## MODELO DE LUZ DIURNA DEL CASO BASE

La geometría del caso base se desarrolló en Revit, incorporando opciones de dispositivos de sombreado para cada piso. Los supuestos de simulación son los siguientes:

- No hay cubiertas de ventanas ni tabiques interiores.
- La reflectividad se establece en 80% para cielos falsos, 20% para pisos y 50% para paredes.
- El acristalamiento se especifica como el n.º 1205 de la biblioteca de vidrios D.O.E., con una transmitancia visual de 0,43.
- El plano de análisis se coloca a 0,8 metros, con un tamaño de cuadrícula de 0,6 x 0,6 metros
- Los análisis se realizan a las 10:00 y a las 15:00.
- La tela de sombreado tiene una transmitancia de luz visual (VLT) de 0,29 y una reflectancia óptica de 30%.
- El componente cielo se basa en datos meteorológicos anuales de Chennai.

Se realizan doce análisis un día al mes a las 10:00 y a las 15:00, con los resultados promediados y presentados en la Figura 7.

## OBSERVACIONES

1. La configuración diagrid demuestra un rendimiento superior, como se muestra en la Figura 7.
2. La pantalla solar funciona por debajo de la línea de

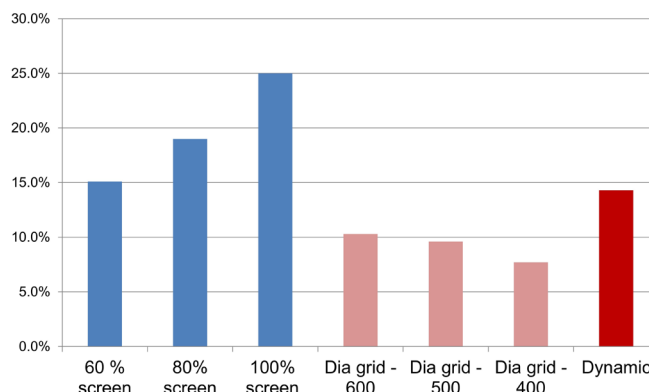


Figura 6. El ahorro de energía es mejor que no sombrear en absoluto con los tipos de dispositivos de sombreado. Fuente: Preparación por los autores.

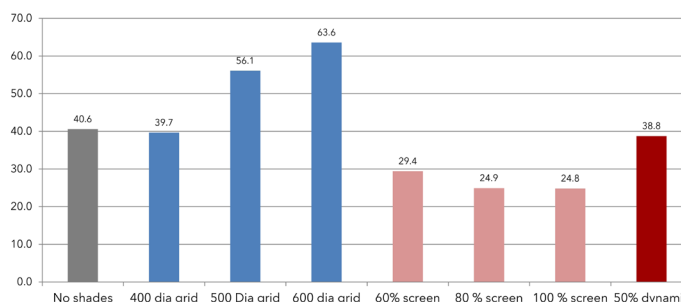


Figura 7. Análisis de la luz diurna mediante un rango personalizado de 200-2000 lux para el porcentaje del área de piso utilizable a las 9:00 y 15:00. Fuente: Preparación por los autores.

base sin sombra, mientras que el sombreado dinámico logra resultados equivalentes a la condición sin sombra, como se muestra en la Figura 7.

3. El sombreado controla eficazmente el deslumbramiento por encima del umbral de 2000 lux, superando el escenario sin sombra, como se muestra en la Figura 7.

## PERÍODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

El período de recuperación de la inversión es un método eficiente para evaluar la viabilidad económica de las soluciones en las etapas iniciales de diseño (Malatji et al., 2013; Chidiac et al., 2011). Representa el tiempo necesario para que una iniciativa recupere su inversión inicial a través de reducciones de costos. Esta investigación muestra que solo la conservación de energía para el enfriamiento de espacios supera el escenario de referencia. El cálculo del período de recuperación de la inversión representa el costo de la inversión inicial del dispositivo de sombreado, según lo determinado por los datos del estudio de caso y por la Ecuación 3.

$$P_b = IIC - Ofa / AES-Ofa$$

(Ecuación 3)

| Opciones de dispositivo de sombreado | Costo por panel | ICC para un piso en las fachadas este, oeste y sur, área de 600 m² | Costo ICC por área de piso de oficina en R/m² | ASE por m² de área de oficina kWh/m²/año | Período de recuperación de la inversión en años |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 400 Diagrid                          | 36250           | 978750                                                             | 725                                           | 63,2                                     | 11,48                                           |
| 500 Diagrid                          | 41650           | 1124550                                                            | 833                                           | 78,7                                     | 10,58                                           |
| 600 Diagrid                          | 46600           | 1258200                                                            | 932                                           | 84,5                                     | 11,03                                           |
| pantalla del 60%                     | 20800           | 561600                                                             | 416                                           | 123,9                                    | 3,36                                            |
| pantalla del 80 %                    | 26400           | 712800                                                             | 528                                           | 155,8                                    | 3,39                                            |
| pantalla del 100%                    | 32000           | 864000                                                             | 640                                           | 205,1                                    | 3,12                                            |
| Dinámico                             | 98000           | 2646000                                                            | 1960                                          | 117,3                                    | 16,71                                           |

Tabla 6. Costo del panel de sombreado en USD, con instalación y otros costos, por metro cuadrado del piso de la oficina y su ahorro de energía. Fuente: Preparación por los autores.

Donde: Pb = período de recuperación de la inversión; IIC-Ofa = costo de inversión inicial por metro cuadrado de área de piso de oficina para las opciones de modernización; AES-Ofa = ahorro anual de energía por metro cuadrado de área de piso de oficina para el enfriamiento de espacios. Los costos de inversión iniciales se basaron en los precios comerciales promedio nacionales de la India y en los profesionales de la construcción de Chennai. Los costos del dispositivo de sombreado por m² del área de fachada (Tabla 6) se calculan con una tasa de conversión de \$1 = ₹78 (IRS, 2022). Este costo, multiplicado por el área de fachada y dividido por el área de oficinas, da IIC por opción. Utilizando la tasa comercial TNEB de Rs. 8,5 / kWh (Comisión Reguladora de Electricidad de Tamil Nadu [TNERC], 2017), se calcula el ahorro anual de energía en el enfriamiento de espacios por m². La Figura 8 muestra el período de recuperación de la inversión para todas las opciones en función del ahorro de energía y de los costos de inversión.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los hallazgos indican que la eficacia de los sistemas de sombreado externo en climas cálidos y húmedos está influenciada no solo por la presencia de sombreado, sino también por la interacción entre las propiedades del material, la configuración geométrica y el comportamiento operativo. Investigaciones anteriores han subrayado las ventajas medioambientales de las membranas textiles, en particular su naturaleza liviana, alta reflectancia solar, adaptabilidad y características semitransparentes (Al-Masrani y Al-Obaidi, 2019; Nurazzi et al., 2021). Este estudio avanza en la comprensión al comparar cuantitativamente pantallas solares fijas, sistemas de sombreado dinámico y sombreado diagrid, utilizando el mismo material de membrana Frontside View 381 de Serge Ferrari en el contexto climático de Chennai.

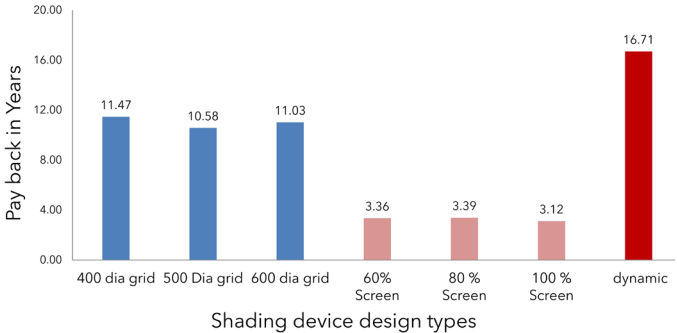


Figura 8. Período de recuperación de la inversión en años para todos los tipos de dispositivos de sombreado seleccionados. Fuente: Preparación por los autores.

Al mantener la consistencia del material, el estudio aísla el impacto de la tipología de sombreado y del comportamiento del sistema en el rendimiento energético de enfriamiento.

Entre las tres tipologías examinadas, el sistema de pantalla solar logró la reducción más significativa de la demanda de energía para el enfriamiento, de aproximadamente un 25%. Este hallazgo corrobora investigaciones anteriores de Ciampi et al. (2022), que identificaron las cortinas de tela Frontside View 381 como altamente efectivas para mitigar la ganancia de calor solar en climas cálidos. Sin embargo, este estudio avanza en la literatura al demostrar que el rendimiento de la membrana mejora cuando se integra con una geometría de pantalla continua y uniformemente distribuida. Los resultados también se alinean con Kirimtat y Manioğlu (2024), quienes sostienen que las cubiertas perforadas estáticas pueden superar a los sistemas adaptativos más complejos en

latitudes tropicales debido a su protección constante frente a la radiación solar de alto ángulo. Por lo tanto, el estudio sugiere que en climas cálidos y húmedos, la capacidad de respuesta climática y la estabilidad geométrica pueden influir más que la sofisticación tecnológica. Además, el costo relativamente bajo y el período de recuperación de la inversión más corto mejoran la viabilidad de los sistemas de sombreado fijo en aplicaciones comerciales a gran escala.

El enfoque de simulación basado en materiales también resalta la importancia de la alta reflectancia solar de la membrana textil para minimizar la absorción de calor superficial en comparación con materiales convencionales de alta masa térmica, como el hormigón o el aluminio. Sin embargo, dado que los tres sistemas de sombreado emplearon el mismo material de membrana, la variación del rendimiento energético puede atribuirse principalmente a diferencias en la configuración geométrica y en el comportamiento del sistema. Esto demuestra que la forma de la fachada debe entenderse como un parámetro ambiental activo en lugar de una mera decisión estética.

El sistema de sombreado dinámico logró una reducción moderada del consumo de energía de enfriamiento, de aproximadamente 15%. La literatura existente destaca con frecuencia la adaptabilidad y la capacidad de respuesta de las fachadas cinéticas y de los sistemas móviles basados en textiles (Gonçalves et al., 2024). Sin embargo, los hallazgos presentes indican que la capacidad de adaptación no equivale necesariamente a una mayor eficiencia energética en climas tropicales. Aunque el sistema respondió eficazmente a las cambiantes condiciones solares, su rendimiento general fue inferior al de la pantalla fija debido a una cobertura de sombreado inconsistente y una mayor complejidad operativa. Este hallazgo aborda una brecha significativa identificada en la revisión de la literatura, según la cual los sistemas dinámicos de sombreado de membranas no se habían evaluado previamente en comparación con los sistemas fijos en climas cálidos y húmedos.

Por el contrario, el sistema de sombreado diagrid logró ahorros de energía inferiores al 10%, lo que indica que una mayor apertura y permeabilidad visual pueden reducir el rendimiento térmico. Si bien investigaciones anteriores han enfatizado el potencial estético y visual de las fachadas textiles (Procaccini et al., 2024), el presente estudio aclara la compensación entre el acceso a la luz diurna, la visibilidad hacia el exterior y la reducción de la carga de enfriamiento. Aunque es menos eficiente térmicamente, el sistema facilita una mayor penetración de la luz diurna y vistas al exterior, alineándose con las prioridades arquitectónicas respecto de la experiencia de los ocupantes y de la calidad espacial (Sawyer et al., 2022). En general, el estudio sugiere que los sistemas de pantallas solares fijas ofrecen la solución más equilibrada para edificios de oficinas cálidos y húmedos al integrar la eficiencia térmica, la viabilidad económica y la calidad ambiental interior. Más importante aún, los hallazgos avanzan en la investigación sobre fachadas sensibles al clima al desafiar la suposición de que

las tecnologías adaptativas complejas superan de manera invariable a las estrategias de diseño pasivo.

## CONCLUSIÓN

Este estudio enfatiza el papel esencial de incorporar el diseño del sistema de sombreado en las etapas iniciales del desarrollo arquitectónico, particularmente en edificios de oficinas completamente acristalados y con aire acondicionado en climas cálidos y húmedos como el de Chennai. Los hallazgos indican que las decisiones en la etapa inicial afectan significativamente la demanda de energía de enfriamiento, lo que subraya la necesidad de enfoques de diseño orientados al rendimiento en lugar de la optimización posterior al diseño. Mediante un marco computacional paramétrico, la investigación evaluó sistemáticamente múltiples estrategias de sombreado externo empleando materiales de membrana textil. Entre las opciones evaluadas, la pantalla solar perforada, colocada paralela a la fachada acristalada, resultó ser la solución más efectiva, ofreciendo un equilibrio óptimo entre eficiencia energética, rendimiento de la luz diurna y viabilidad económica. Por el contrario, aunque los sistemas de sombreado dinámico proporcionan un control adaptativo, su alto costo de capital inicial, la complejidad del sistema y los períodos prolongados de recuperación de la inversión limitan su aplicabilidad práctica en economías en desarrollo como la India.

El estudio contribuye al campo al introducir una metodología de simulación basada en materiales que permite realizar comparaciones consistentes entre diferentes tipologías de sombreado utilizando el mismo material de membrana textil. Este enfoque aísla la influencia de la geometría y el comportamiento del sistema, proporcionando así información más clara sobre los resultados de rendimiento. Los resultados confirman que las cortinas solares bien diseñadas pueden reducir significativamente el consumo de energía, al tiempo que mantienen una iluminación natural y un confort visual adecuados, todo ello con costos de inversión relativamente bajos. Sin embargo, el alcance de esta investigación se limita a materiales específicos de membranas textiles, tres orientaciones de fachadas y tres tipos de dispositivos de sombreado, con un enfoque principal en el control de la radiación solar directa en superficies acristaladas. La investigación futura debería ampliar este marco para incluir una gama más amplia de materiales, configuraciones geométricas alternativas, variables climáticas adicionales y parámetros de rendimiento integrados, como la ventilación y la energía incorporada. En general, el estudio destaca el potencial sustancial de los sistemas de fachadas de membranas textiles como una estrategia sostenible y rentable para reducir el consumo de energía en los edificios. Establece una base para una mayor exploración de soluciones de sombreado basadas en membranas, contribuyendo al avance del diseño arquitectónico sensible al clima y orientado al rendimiento.

## CONTRIBUCIÓN DEL AUTOR CRediT

Conceptualización: C. C.; Curación De Datos: C. C.; Análisis Formal: C. C.; Investigación: C. C.; Metodología: C. C.; Administración De Proyectos: C. C.; Recursos: A. M.; Software: C. C.; Supervisión: C. C.; Validación: A. M.; Visualización: A. M.; Escritura – Borrador Original: A. S. K. S.; Escritura – Revisión y Edición: N. M.; Escritura – Revisión y Edición: M. N.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los revisores anónimos por sus comentarios constructivos, que contribuyeron a mejorar el manuscrito. Los autores no recibieron apoyo financiero para la investigación, la autoría y/o la publicación de este artículo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, E.B. (2021). Utilizing dynamic shading system to achieve daylight performance according to LEED standards V.4: case study, university classrooms in Egypt. *HBRC Journal*, 17(1), 177-200. <http://doi.org/10.1080/16874048.2021.1920138>

Alhmoud, S.H., & Alhmoud, H.H. (2024). Analysis of thermal comfort techniques for the performance conserving of buildings and interior spaces. *International journal of sustainable development & planning*, 19(11), 4193-4201. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.191109>

Al-Masrani, S.M., & Al-Obaidi, K. M. (2019). Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. *Automation in construction*, 102, 195-216. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.014>

Arumugam, P., & Ramalingam, V. (2024). Thermal comfort enhancement of office buildings located under warm and humid climate through phase change material and insulation coupled with natural ventilation. *Sustainable energy technologies and assessments*, 63, 103657. <http://doi.org/10.1016/J.SETA.2024.103657>

Barozzi, M, Lienhard, J., Zanelli, A., & Monticelli, C. (2016). The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture. *Procedia Engineering*, 155, 275-284. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.029>

Bhatia, A., Dontu, S., Garg, V., & Singh, R. (2024). Approach for energy efficient building design during early phase of design process. *Energy Informatics*, 7(1), 122. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00426-z>

Brake, T.M. (2011). *Understanding Steel Design: An Architectural Design Manual*. Birkhäuser

Carletti, C., Sciarpi, F., & Pierangeli, L. (2014). The Energy Upgrading of Existing Buildings: Window and Shading Device Typologies for Energy Efficiency Refurbishment. *Sustainability*,

6(8), 5354-5377. <https://doi.org/10.3390/su6085354>

Chockalingam, C. (2021). Envelope Performance Analysis of Office Buildings in Warm and Humid Climate: From Case Studies of Multi-storied Office Buildings in Chennai. In K. Thirumaran, G. Balaji, N.D. Prasad (eds) *Sustainable Urban Architecture* (vol. 114). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-9585-1>

Chi, D. A., Moreno, D., & Navarro, J. (2018). Impact of perforated solar screens on daylight availability and low energy use in offices. *Advances in Building Energy Research*, 15(1), 117-141. <https://doi.org/10.1080/17512549.2018.1550439>

Chidiac, S.E., Catania, E.J.C., Morofsky, E. & Foo, S. (2011). Effectiveness of single and multiple energy retrofit measures on the energy consumption of office buildings. *Energy*, 36(8), 5037-5052. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.050>

Ciampi, G., Spanodimitriou, Y., Nocente, A., Scorpio, M., & Sibilio, S. (2022). Energy performances of tensile material in building renovation in the Nordic region. *E3S Web of Conferences*, 362, 05003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236205003>

Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123-141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>

Comitti, A., Vijayakumaran, H., Nejabatmeimandi, M. H., Seixas, L., Cabello, A., Misseroni, D., Penesa, M., Paech, C., Bessa, M., Bown, A.C. Dal Corso, F., & Bosi, F. (2024). Ultralight membrane structures toward a sustainable environment. In A. Bahrami (eds) *Estructuras y edificios sostenibles* (pp. 17-37). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46688-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46688-5_2)

Dynamo. (n.d.). Dynamo forum. <http://dynamobim.com>

García-Martín, G., Campano, M. Á., Acosta, I., & Bustamante, P. (2025). New approaches in dynamic metrics for lighting control systems: A critical review. *Applied sciences*, 15(15), 8243. <https://doi.org/10.3390/app15158243>

Gonçalves, M., Figueiredo, A., Almeida, R.M.S.F., & Vicente, R. (2024). Dynamic façades in buildings: A systematic review across thermal comfort, energy efficiency and daylight performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114474>

Hwang, R.-L., & Chen, W.-A. (2022). Creating glazed facades performance map based on energy and thermal comfort perspective for office building design strategies in Asian hot-humid climate zone. *Applied Energy*, 311, 118689 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118689>

IRS (2022). Yearly average exchange rates for Indian Rupee to US \$. <https://www.irs.gov/individuals/international-taxpayers/yearly-average-currency-exchange-rates>

Kirimtat, A., & Manioğlu, G. (2024). A simulation-based performance evaluation of new generation dynamic shading devices with multi-objective optimization. *Journal of Building Engineering*, 90, 109322. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109322>

Lawrence Berkeley National Laboratory – James J. Hirsch & Associates. (2009). DOE- 2.2 Building Energy Use and Cost

Analysis Program. Volume 4: Libraries & Report. March 2009. James J. Hirsch

Malatji, E.M., Zhang, J., & Xia, X. (2013). A multiple objective optimisation model for building energy efficiency investment decision. *Energy and Buildings*, 61, 81–87. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.042>

Mollaert, M. & De Laet, L. (2017). Novel Structural Skins: Improving sustainability and efficiency through new structural textile materials and designs – COST Action. *Impact*, 2017(5), 46-48. <http://doi.org/10.21820/23987073.2017.5.46>

Murta, A. (2015). *GPC: General Polygon Clipper library, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1512.006*. SciX Transition Resource. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015ascl.soft12006M>

Natural Resources Defense Council [NRDC] & Administrative Staff College of India [ASCI]. (2014). *Transforming Cities: Building Efficiency Lessons from Hyderabad*. [https://tgredco.telangana.gov.in/PDFs/ECBC/6\\_Transforming\\_Cities\\_Building\\_Efficiency\\_Lessons.pdf](https://tgredco.telangana.gov.in/PDFs/ECBC/6_Transforming_Cities_Building_Efficiency_Lessons.pdf)

Nurazzi, N.M., Asyraf, M.R.M., Khalina, A., Abdullah, N., Aisyah, H.A., Rafiqah, S.A., Sabaruddin, F.A., Kamarudin, S.H., Norrrahim, M.N.F., Ilyas, R.A., & Sapuan, S.M. (2021). A Review on Natural Fiber-Reinforced Polymer Composite for Bullet Proof and Ballistic Applications. *Polymers*, 13(4), 646. <https://doi.org/10.3390/polym13040646>

Procaccini, G., Prieto, A., Knaack, U., Monticelli, C., & Konstantinou, T. (2024). Textile membrane for façade retrofitting: exploring fabric potentialities for the development of innovative strategies. *Buildings*, 14(1), 86. <http://doi.org/10.3390/buildings14010086>

S. A. Industries BEC, (2014). *Stamisol FT 381*. <http://www.bec.es/en/fabrics-for-curtains-blinds-screens-and-textil-architecture/textile-meshes/stamisol-ft-381>

São João, L., Carvalho, R., & Figueiro, R. (2016). A Study on the Durability Properties of Textile Membranes for Architectural Purposes. *Procedia Engineering*, 155, 230-237. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.024>

Sawyer, A. O., Navvab, M., Weissman, D., & Guanzhou, J. (2022). Facade photometry: Linking annual daylight performance to facade design. *Buildings*, 12(10), 1556. <https://doi.org/10.3390/buildings12101556>

Serge Ferrari group. (n.d.a) Projects Serge Ferrari. <https://www.sergeferrari.com/us-en/references/largest-textile-facade-netherlands-serge-ferrari>

Serge Ferrari group. (n.d.b). Tenseo. Frontside 381. <https://www.sergeferrari.com/en-nz/productsfrontside-range/frontside-view-381>

Shi, X., Tablada, A., & Wang, L. (2020). Influence of two motion types on solar transmittance and daylight performance of dynamic façades. *Solar Energy*, 201, 561-580. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.017>

Sorooshnia, E., Rahnamayiezekavat, P., Rashidi, M., Sadeghi, M., & Samali, B. (2023). Passive intelligent kinetic external dynamic

shade design for improving indoor comfort and minimizing energy consumption. *Buildings*, 13(4), 1090. <https://doi.org/10.3390/buildings13041090>

TensiNet. (n.d.). <https://www.tensinet.com/index.php>

Thalfeldt, M., Kurnitski, J. & Voll, H. (2015). Comparison of Simplified and Detailed Window Models in Office Building Energy Simulations. *Energy Procedia*, 78, 2076-2081. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.235>

Tian, G-J., Fan, Y-S., Zhang, X., Wang, H., Xie, W., & Peng, K. (2020). Analysis of solar radiation heat transfer of architectural fabric membrane material. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15. <https://doi.org/10.1177/1558925020911005>

Tamil Nadu Electricity Regulatory Commission [TNERC]. (2017). Determination of Tariff for Generation and Distribution. Order in T.P. No.1 of 2017 DT:11.08.2017. Government of Tamilnadu. <https://tecaonline.in/pdfupload/Files/TNERC%20Tariff%20Order-TANGEDCO%20dtd-11-08-2017.pdf>

Wang, J., Huang, X., Wang, W., Han, H., Duan, H., Yu, S., & Zhu, M. (2022). Effects of PTFE coating modification on tribological properties of PTFE/aramid self-lubricating fabric composite. *Materials Research Express*, 9(5), 055302. <http://doi.org/10.1088/2053-1591/ac587a>

