



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN HÁBITAT SUSTENTABLE Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA**

AUTOR:

ELSA DACOSTA VIDAL

PROFESOR GUÍA:

DRA. PAULINA WEGERTSEDER

Profesor Co-Guía

Dra. Beatriz Piderit

CONCEPCIÓN, 23 DE ABRIL DE 2021

MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO TÉRMICO-LUMÍNICO MEDIANTE LA
OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE FACHADAS EN EDIFICIOS DE OFICINAS
CONTEMPORÁNEOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

Resumen

Es necesario establecer la óptima interacción multivariable de estrategias de diseño pasivo de fachadas que mejoren el confort térmico y lumínico al interior de edificios de oficinas en la Ciudad de Guatemala, mediante la determinación del efecto relacionado que provocan entre ellas. Actualmente, en la Ciudad de Guatemala (latitud 14.58° y longitud -90.52°), se ha implementado arquitectura, tecnología, materiales y tendencias de diseño importadas desde otras latitudes, las cuales demandan un alto consumo de energía para refrigeración e iluminación y no garantizan necesariamente el confort térmico-lumínico del espacio interior de los edificios. Es por esto que se determinan las principales estrategias de diseño pasivo de fachadas en edificios con alto rendimiento térmico-lumínico, las cuales son, relación ventana-muro, transmitancia térmica de la envolvente, transmisión lumínica del acristalamiento, e implementación de los dispositivos de control solar; por medio del software Design Builder, basado en Energy Plus y Radiance se evalúa de forma integral el impacto estas estrategias en el confort térmico-lumínico de un modelo hipotético de oficinas en la Ciudad de Guatemala, en función de la normativa de confort térmico adaptativo, ASHRAE 55-2017 y 62.1, junto a las métricas de confort lumínico de Annual Sunlight Exposure (ASE), Spatial Daylight Autonomy (sDa) y Useful Daylight Illuminance (UDI). Los resultados muestran que se puede lograr aproximadamente el 70% de la totalidad del tiempo en confort térmico, es decir, 1977 horas de 2871 del tiempo de ocupación, sin ningún sistema de climatización, así mismo, el valor de Useful Daylight Illuminance es de 96%, y Annual Sunlight Exposure de 10% valores considerados óptimos, y un Spatial Daylight Autonomy del 79%, con lo cual, se obtiene una mejoría del 42% del tiempo en confort térmico, como un 30% de mejoría de Useful Daylight Illuminance, y un 20% de mejoría de Annual Sunlight Exposure respecto a los resultados del modelo teórico inicial.

Palabras claves: Confort térmico y lumínico, optimización de fachadas, edificios de oficinas, Ciudad Guatemala.

Abstract

It is necessary to establish the optimal multivariate interaction of passive facade design strategies that improve thermal and light comfort inside office buildings in Guatemala City, by determining the related effect they have on each other. Currently, in Guatemala City (latitude 14.58° and longitude -90.52°), architecture, technology, materials and design trends imported from other latitudes have been implemented, which demand a high energy consumption for cooling and lighting and do not necessarily guarantee the thermal-light comfort of the interior space of the buildings. This is why the main strategies of passive design of facades are determined in buildings with high thermal-light performance, which are, window-wall ratio, thermal transmittance of the envelope, light transmission of glazing, and implementation of solar control devices; Design Builder software, based on Energy Plus and Radiance, comprehensively evaluates the impact of these strategies on the thermal-light comfort of a hypothetical model of offices in Guatemala City, according to the adaptive thermal comfort regulations, ASHRAE 55-2017 and 62.1, together with the light comfort metrics of Annual Sunlight Exposure (ASE), Spatial Daylight Autonomy (sDa) and Useful Daylight Illuminance (UDI). The results show that approximately 70% of the total time can be achieved in thermal comfort, i.e. 1977 hours of 2871 of the occupancy time, without any air conditioning system, as well as the value of Useful Daylight Illuminance is 96%, and Annual Sunlight Exposure of 10% values considered optimal, and a Spatial Daylight Autonomy of 79%, thus, you get an improvement of 42% of the time in thermal comfort, such as 30% improvement of Useful Daylight Illuminance, and a 20% improvement of Annual Sunlight Exposure compared to the results of the initial theoretical model.

Índice

1.	Introducción	1
1.1	Formulación general del problema	2
1.2	Hipótesis.....	4
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Objetivo general.....	4
1.3.2	Objetivos específicos.....	4
1.4	Metodología	5
2.	Confort térmico y lumínico en edificios	9
2.1.	Confort térmico.....	9
1.1.	Confort lumínico.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2.	Interacción del confort térmico y lumínico en la percepción del ser humano	¡Error! Marcador no definido.
1.3.	Implicación del confort térmico y lumínico en el consumo de energía de los edificios	¡Error! Marcador no definido.
3.	Estrategias pasivas de confort térmico y lumínico.....	15
3.1.	Estrategias de mejora de la envolvente térmica.....	16
3.2.	Estrategias pasivas de control solar	17
3.3.	Metodología de integración de estrategias para confort térmico y lumínico	19
4.	Contexto de estudio	22
4.1.	Clima en la Ciudad de Guatemala	22
4.2.	Casos de estudio de edificios en Guatemala.....	25
4.3.	Normativas de construcción en la Ciudad de Guatemala	32
5.	Diagnóstico y mejoramiento del desempeño integral térmico-lumínico de edificios de oficinas	35
5.1.	Diagnóstico de desempeño térmico-lumínico inicial	¡Error! Marcador no definido.
5.1.1.	Construcción de modelo teórico inicial.....	¡Error! Marcador no definido.

5.1.2.	Configuración de plantillas de simulación para diagnóstico de modelo teórico inicial	37
5.1.3.	Resultados de diagnóstico térmico-lumínico del modelo teórico inicial	38
5.2.	Optimización del desempeño térmico-lumínico de oficinas.....	40
5.2.1.	Multivariables de optimización del desempeño térmico-lumínico	40
5.2.2.	Metodología para la optimización del desempeño integral térmico-lumínico.....	45
5.2.3.	Resultados de optimización del desempeño integral térmico-lumínico.....	49
5.2.4.	Directrices de diseño para la mejora integral de confort térmico-lumínico de edificios	¡Error! Marcador no definido.
6.	Conclusiones.....	¡Error! Marcador no definido.
7.	Limitaciones.....	¡Error! Marcador no definido.
8.	Referencias bibliográficas.....	74

Lista de Tablas

Tabla 1.	Selección de estrategias pasivas de diseño de fachadas y parámetros de evaluación.....	7
Tabla 2.	Parámetros del Plan de Ordenamiento Territorial POT para zona G5 y configuración de modelo teórico inicial.....	34
Tabla 3.	Plantilla de actividad.....	37
Tabla 4.	Plantilla de construcción.....	37
Tabla 5.	Plantilla de iluminación.....	38
Tabla 6.	Plantilla de HVAC.....	38
Tabla 7.	Resultados de desempeño térmico-lumínico del modelo teórico inicial.....	39
Tabla 8.	Resumen de métricas de luz natural que se utilizarán para evaluación y alcance de objetivos.....	46

Tabla 9. Plantilla de actividad – optimización de desempeño térmico-lumínico.....	47
Tabla 10. Plantilla de construcción – optimización de desempeño térmico-lumínico.....	47
Tabla 11. Plantilla de aperturas – optimización de desempeño térmico-lumínico.....	48
Tabla 12. Plantilla de iluminación – optimización de desempeño térmico-lumínico.....	49
Tabla 13. Plantilla de HVAC – optimización de desempeño térmico-lumínico.....	49
Tabla 14. Resultados de optimización.....	49
Tabla 15. Desempeño térmico-lumínico del modelo óptimo 1.....	50
Tabla 16. Desempeño térmico-lumínico del modelo óptimo 2.....	51
Tabla 17. Desempeño térmico-lumínico del modelo óptimo 3.....	52
Tabla 18. Desempeño térmico-lumínico del modelo óptimo 4.....	53
Tabla 19. Desempeño térmico-lumínico del modelo óptimo 5.....	54
Tabla 20. Comparación del desempeño térmico-lumínico de modelo teórico inicial y modelo óptimo 3.....	60
Tabla 21. Mejora de desempeño térmico de modelo experimental a partir de la implementación y variación de ancho de dispositivos de control solar.....	63
Tabla 22. Comparación de desempeño lumínico de modelo óptimo 2 y 5.....	64
Tabla 23. Resultados de optimización de desempeño térmico-lumínico.....	65

Lista de Figuras

Figura. 1. Localización de la Ciudad de Guatemala.....	22
Figura 2. Cartografía de Plan de Ordenamiento Territorial.....	32
Figura 3. Modelo teórico experimental de edificio de oficinas en la Ciudad de Guatemala.....	36
Figura 4. Variables predictoras de optimización de la envolvente.....	40
Figura. 5. Porcentaje de relación ventana-muro de 30 a 100% en acercamiento de fachada con dispositivos de control solar.....	41
Figura. 6. Detalle de muros de estudio.....	42
Figura. 7. Tipos de dimensionamiento de dispositivos de control solar.....	43
Figura 8. Matriz de análisis de ángulo solar.....	44
Figura. 9. Modelo teórico experimental inicial.....	58
Figura. 10. Mejor optimización de modelo y acercamiento de fachada.....	58

Lista de Gráficos

Gráfica. 1. Temperatura media del aire exterior en °C, durante las horas anuales de estudio (2871 hrs. de lunes a viernes de 8h00 a 18h00, desde enero a diciembre).....	11
Gráfica 2. Límites de temperatura operativa para espacios acondicionados naturalmente.....	11
Gráfica 3. Carta Solar de la Ciudad de Guatemala.....	24
Gráfica 4. Temperatura operativa interior en el tiempo de ocupación (hrs) y su relación con los límites de confort térmico adaptativo según ASHRAE 55-2017 para el 90 y 80%, del modelo teórico inicial.....	59

Gráfica 5. Temperatura operativa interior en el tiempo de ocupación (hrs) y su relación con los límites de confort térmico adaptativo según ASHRAE 55-2017 para el 90 y 80%, del modelo óptimo 3.....	59
Gráfica 6. Correlación directa entre horas de confort térmico adaptativo ASHRAE 55 80% y porcentaje ventana-muro.....	61
Gráfica 7. Porcentaje de superficie dentro de límites de sDA, ASE y UDI, en relación con el porcentaje de ventana-muro.....	62

1. Introducción

En contextos urbanos, ha sido estimado que los seres humanos destinan al menos un 80% de su tiempo a la vida en el espacio interior (Manzano-Agugliaro et al., 2015). Por lo tanto, el diseño arquitectónico, debiese proveer a sus ocupantes de ambientes confortables y saludables ya que esto puede tener un impacto significativo en el confort, salud y productividad de las personas (Jara, 2015). Dos de los factores ambientales básicos en el entorno interior que pueden influir en la percepción del ambiente a través de los sentidos, así como tener una consecuencia en el estado físico y mental del ser humano, afectando su comodidad y salud es el confort térmico y lumínico (Bluyssen, 2012). Es por esto, que la fachada es uno de los elementos de mayor importancia en la fase de diseño de un edificio, ya que a partir de la optimización de esta se puede lograr la integración adecuada de estrategias que brinden tanto confort térmico como lumínico al espacio interior (Carlos Ernesto Ochoa & Capeluto, 2009). Se sabe que los edificios totalmente acristalados son apropiados en ciertos contextos climáticos como en el clima inglés (Mansfield, 2018). Sin embargo, en las regiones tropicales y subtropicales un aspecto básico de la arquitectura es el control solar (de la Paz, 2012). Debido a que la Ciudad de Guatemala se encuentra ubicada en la franja de climas cálidos con predominio de temperaturas elevadas y clima tropical estacional, con una temperatura media anual de 18°C, se cuestiona el desempeño térmico-lumínico de las fachadas de edificios de oficinas que existen en la actualidad dentro de la ciudad, ya que en su mayoría se caracterizan por tener un porcentaje alto de acristalamiento y escasez de elementos de control solar, siendo ésta última la principal estrategia de diseño bioclimático que debería utilizarse en regiones tropicales (Zambrano Prado, 2013).

El siguiente trabajo busca encontrar el equilibrio entre el confort térmico y lumínico de un edificio teórico de oficinas en la Ciudad de Guatemala a partir de la óptima interacción multivariable de estrategias de diseño pasivo para fachadas, (relación ventana-muro, transmitancia térmica de la envolvente, transmisión lumínica de la ventana, e implementación de dispositivos de control solar), lo cual, determinaría criterios de diseño de fachadas para edificios nuevos como existentes a partir de su rehabilitación, con esto se esperaría lograr un 100% de confort térmico y lumínico en el horario de ocupación.

1.1 Formulación general del problema

El problema principal que aborda el proyecto es el inconfort térmico y lumínico en edificios de oficinas en Guatemala debido a la sobreexposición solar directa en fachadas altamente acristaladas. En la actualidad, se ha implementado arquitectura, tecnología, materiales y tendencias de diseño importadas desde otras latitudes, las cuales demandan un alto consumo de energía para refrigeración e iluminación y no garantizan necesariamente el confort interior de los edificios (Jara, 2015). Se sabe que los edificios totalmente acristalados son apropiados en ciertos contextos, como en el clima inglés (Mansfield, 2018). Sin embargo, en las regiones tropicales y subtropicales un aspecto básico de la arquitectura es el control solar, así como la implementación de criterios de diseño arquitectónico que garanticen una buena ventilación e iluminación natural (Jiménez, 2015, p.8). El sol y su alta incidencia en estas regiones, hace que una de las estrategias prioritarias de la arquitectura bioclimática sea el control solar, ya que de esta forma no tendría que enfriarse aquello que no se ha calentado (Zambrano Prado, 2013).

Alibaba (2016) en su investigación sobre la relación óptima de ventana-muro analiza el porcentaje de ventana-muro exterior más adecuado y diferentes configuraciones de apertura de ventanas para fachadas de edificios en clima cálido y húmedo, indica que las ventanas pueden ser puntos débiles de la envolvente del edificio, debido a los altos niveles de radiación solar durante el período de verano en ambientes calurosos y húmedos lo que aumenta las cargas de enfriamiento interior, por lo tanto, la proporción correcta de ventana-muro externa y la proporción de apertura correcta de la ventana reducirá las cargas de refrigeración y aumentará el confort térmico.

Además de esto, Ochoa et al., (2012) aseguran que el impacto del uso de elementos de sombreado y los tipos de ventanas adecuados puede ahorrar un 15% de energía para edificios de fachadas totalmente acristalados. Roache et al., (2000) y Mardaljevic (2014) también indican que en las oficinas muy acristaladas la gente está menos satisfecha debido a los altos niveles de suministro de luz diurna y la propensión asociada a la incomodidad. Si bien se observa que la satisfacción con la luz del día es un problema complicado dependiendo de muchos otros factores como la orientación de la fachada, las obstrucciones y la eficacia de las persianas, se considera que los niveles de luz

diurna que se son demasiado bajos pueden complementarse fácilmente con iluminación eléctrica, mientras que los niveles que son demasiado altos están asociados con problemas que son más complejos de tratar como por ejemplo, el deslumbramiento y sobrecalentamiento.

La búsqueda de estrategias de diseño pasivo en fachadas que garanticen tanto el confort térmico como lumínico podría conllevar cierto antagonismo para lograr ambos objetivos, sin embargo, en la investigación sobre percepción del usuario de Garretón, et al., (2016) se afirma que existe una relación implícita entre el confort térmico y lumínico, en donde se muestra que el deslumbramiento genera molestias debido a la alta iluminación diurna, lo que anticipa el sobrecalentamiento relacionado con la radiación solar. Así mismo, Yang & Jun (2019) muestran que al mejorar el confort visual se podría mejorar la percepción de satisfacción térmica de los ocupantes indirectamente.

Te Kulve et al., (2016) confirma que la luz influye indirectamente en el comportamiento, sueño, cognición, trastornos afectivos estacionales, producción de melatonina, producción de cortisol y temperatura corporal central, debido a que las vías neuronales que se activan por la luz y la temperatura se combinan en un modelo para mostrar las conexiones potenciales entre las respuestas visuales y térmicas, esto revela que ambos sistemas comparten el hipotálamo, aunque están conectadas a diferentes núcleos, en conclusión, la luz es importante en la regulación del ritmo circadiano, controlando así los ritmos termo fisiológicos. Garretón et al., (2016) afirma que alcanzar la comodidad térmica y lumínica son algunas de las características más importantes y dominantes en cualquier situación de trabajo, por esta razón, es necesario estudiarlos por separado, así como sus interacciones.

Por lo tanto, es importante crear nuevas metodologías de diseño enfocadas a mejorar el desempeño térmico-lumínico de edificios de oficinas existentes y nuevos a partir de la optimización de su fachada en donde se logre la integración sinérgica de estrategias pasivas multivariables de diseño.

1.2 Hipótesis

Es posible lograr un 100% de confort térmico y lumínico en el interior de edificios de oficinas en la Ciudad de Guatemala, a partir de las siguientes estrategias de diseño pasivo para fachadas, (relación ventana-muro, transmitancia térmica de la envolvente, transmisión lumínica de la ventana e implementación de dispositivos de control solar).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Definir estrategias pasivas de diseño de fachadas para el mejoramiento del confort térmico y lumínico al interior de edificios de oficinas en la Ciudad de Guatemala, desde una perspectiva sinérgica y multivariable.

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar rangos de confort adecuados al contexto guatemalteco según normativas y sistemas de certificación validados para garantizar confort térmico y lumínico en espacios de oficinas.

Seleccionar las estrategias pasivas de diseño que influyen en el mejoramiento del confort térmico y lumínico de edificios construidos en el clima tropical templado de la Ciudad de Guatemala.

Diagnosticar el desempeño térmico y lumínico integrado al iterar estrategias combinadas establecidas anteriormente.

Establecer las estrategias que alcanzan mejor un mejor equilibrio entre confort térmico y lumínico para definir ciertas directrices de diseño de fachadas para edificios nuevos como existentes.

1.4 Metodología

La metodología propuesta se centra en cuatro etapas: 1. Métricas dinámicas para la evaluación del confort lumínico y aplicación del modelo de confort térmico adaptativo en el clima de estudio. 2. Selección de estrategias pasivas de diseño para fachadas de edificios que optimicen el confort térmico y lumínico interior y construcción del modelo teórico inicial. 3. Evaluación integral de estrategias a partir del confort térmico y lumínico interior. 4. Determinación de directrices que mejoren el confort térmico y lumínico en edificios de oficinas en la Ciudad de Guatemala.

1.4.1. Determinación de rangos de confort térmico y lumínico para edificios de oficinas

Aplicación de modelo de confort térmico adaptativo (ASHRAE 55-2017)

Para la aplicación del modelo de confort térmico adaptativo de la normativa ASHRAE 55, se ha determinado la temperatura media del aire exterior durante el horario de ocupación de una oficina típica en la Ciudad de Guatemala, situada en latitud 14.58° y longitud - 90.52°, en el altiplano central, el cual corresponde de enero a diciembre, de lunes a viernes, de 8h00 a 18h00 horas, dando como resultado un total de 2871 horas anuales de estudio. Durante este horario se obtiene una temperatura media exterior de 21°C. Según la normativa ASHRAE 55, los límites de temperatura operativa aceptable para espacios acondicionados naturalmente, para lograr un 90% de confort térmico adaptativo, corresponden a un mínimo de 22°C y un máximo de 27°C. y para lograr un 80% de confort térmico adaptativo, corresponden a un mínimo de 21°C y un máximo de 28°C. Valores que utilizará el programa Design Builder más adelante para determinar la cantidad de horas que se salen de los límites de confort térmico.

Métricas dinámicas de confort lumínico

Para la evaluación de El Useful Daylight Illuminance (UDI) se establece un rango de iluminación diurna de 100 lux a 2000 lux, estos límites se basan en informes de preferencias y comportamientos de ocupación en oficinas con iluminación natural y dispositivos de control solar operados por el usuario; se considera una ocurrencia útil arriba del 80%.

Así mismo, cuando las iluminancias superan el límite superior de UDI es indicativo del potencial de inconfort lumínico y térmico, por lo tanto, se utiliza el Annual Sunlight Exposure (ASE) como segunda métrica ya que describe el potencial de incomodidad visual y de ganancia solar térmica en los ambientes interiores, ocasionado por el efecto de luz solar directa (1.000 lux), a partir de un número específico de horas al año (250 hrs), el cual no debiese ser superior al 10%, así mismo, la métrica SDA mide la suficiencia de luz diurna para un área determinada, informando un porcentaje del área que excede un valor de iluminancia objetivo (300 lux), durante un período de tiempo específico al año (50% de las horas anuales), se considera un porcentaje favorable mayor a 75%.

1.4.2. Selección de estrategias pasivas de diseño para fachadas que optimicen el confort térmico y lumínico interior de edificios en la Ciudad de Guatemala

Selección de estrategias pasivas de diseño de fachadas

De acuerdo con la revisión bibliográfica se seleccionan las multivariantes que destacan en investigaciones previas para su posterior evaluación en esta investigación, las cuales son: relación de ventana-muro, transmitancia térmica de la envolvente, dimensionamiento de dispositivos de control solar, transmisión lumínica de ventana (Tabla 1). Ya que es necesario reiterar que los valores que se les da a las diferentes estrategias cambiarán de acuerdo con el clima y modelo experimental de estudio.

Construcción del modelo teórico inicial según casos de estudios y Plan de Ordenamiento Territorial de Guatemala

Se realiza una selección de casos de estudio de edificios de oficinas en la Ciudad de Guatemala, que tengan arriba de 12 pisos y se encuentren ubicados en la zona G5 para áreas de alta densidad urbana según el Plan de Ordenamiento Territorial POT, también se hace una revisión de las normativas de construcción en la zona. A partir de estas similitudes y de las normativas del POT, se define un modelo teórico de oficinas inicial y se verifica su desempeño térmico-lumínico.

Tabla 1. Selección de estrategias pasivas de diseño de fachadas y parámetros de evaluación

Estrategias pasivas de diseño de fachadas	Parámetros de evaluación	Criterio de selección	Referencia
Relación ventana-muro	30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100%	Se observa en otras investigaciones el estudio de esta variable y su relación con el confort térmico de forma independiente, sin embargo, en esta investigación se busca comprender su influencia en el desempeño térmico-lumínico en combinación de otras variables para encontrar la relación adecuada de porcentaje ventana-muro que logra una mejor integración y alcance el objetivo de mejora del desempeño del confort térmico-lumínico en el contexto climático de la Ciudad de Guatemala.	(Alibaba, 2016) (Thalfeldt et al., 2013) (Ochoa et al., 2012) (Gasparella et al., 2011) (Ahn et al., 2016)
Transmitancia térmica ventana	5.69 w/m ² K 2.52 w/m ² K 1.97 w/m ² K	Se busca encontrar el balance térmico entre el espacio interior y exterior, a través de diferentes alternativas de transmitancia térmica de muro y ventana, que van de mayor a menor según las características del material. Los valores U más bajos se toman de investigaciones ubicadas en diferentes contextos climáticos al norte o sur de la zona ecuatorial, y los valores más altos se toman de las propiedades de los materiales de casos de estudio que hay actualmente en Guatemala, esto se hace con el fin de comprender la influencia de la transmitancia térmica de los materiales en el desempeño térmico de oficinas en el clima cálido templado de la Ciudad de Guatemala.	(Waldo Bustamante et al., 2011) (Mansfield, 2018)
Transmitancia térmica muro	2 w/m ² K 0.53 w/m ² K 0.32 w/m ² K		(Leskovar & Premrov, 2011) (Asadi et al., 2012)
Transmisión lumínica de la ventana	0.89 0.55	Investigaciones sostienen que se logra mejor calidad visual al generar el menor contraste de ventana con el exterior, sin embargo, en Guatemala para minimizar los posibles problemas de deslumbramiento se utiliza vidrio reflectivo azul de menor transmisión lumínica, por lo tanto, se busca comprender realmente la efectividad de dos valores de transmisión lumínica en combinación con las demás variables de estudio.	(Faisal & Aldy, 2016) (León, 2013, p. 6)
Ancho de voladizo - partesol - repisa	0.50m - 0.50m - 0.50m 0.50m - 0.50m - 0.85m 0.85m - 0.85m - 0.50m 0.85m - 0.85m - 0.85m	Se busca disminuir la radiación solar directa y aumentar el ingreso de radiación solar difusa, así como generar mayor apertura visual al exterior, a través de la relación adecuada de los elementos que obstruyen el ingreso de iluminación directa.	(Garretón et al., 2016) (De la Paz, 2012) (Jiménez, 2015) (Zambrano Prado, 2013)

1.4.3. Evaluación integral de estrategias a partir del confort térmico y lumínico interior

Se evalúa de forma integral el confort térmico y lumínico en la herramienta Design Builder, que se basa en Energy Plus y Radiance. En donde se configuran los diferentes tipos de muro y ventana en la plantilla de construcción y aperturas, así como las variables de dispositivos de control solar y

transmisión lumínica. En la plantilla de iluminación se establece un control lineal el cual representa un mecanismo útil para calcular el máximo potencial de ahorro mediante el aprovechamiento de la luz natural, a través de sensores de iluminación que gradúan la iluminación interior a partir de los 500 lux, cuando la luz natural disminuye permite que la iluminación general artificial aumente gradualmente. A continuación, en la herramienta de optimización se establecen dos objetivos, disminuir tanto el consumo de energía por iluminación artificial, así como la cantidad de horas de incomfort térmico. En función de las soluciones óptimas que entrega el programa, se utiliza la herramienta de Daylight para el cálculo de UDI, ASE, SDA, en el piso 7 del modelo experimental.

1.4.4. Determinación de directrices que mejoren el confort térmico y lumínico en edificios de oficinas en la Ciudad de Guatemala

Se busca determinar las siguientes directrices:

1. La relación de ventana-muro de la fachada que garantice tanto el confort térmico como lumínico en el interior del edificio;
2. Qué valor de transmitancia térmica de la envolvente es el adecuado para lograr un mejor equilibrio térmico, ya que, en varias investigaciones en diferentes zonas climáticas ubicadas al norte o sur de la zona ecuatorial, se logra mayor confort al disminuir al máximo la transmitancia térmica de la envolvente del edificio, sin embargo, en una zona con clima tropical templado, podría ser que el resultado se invierta y el equilibrio térmico se genere con un valor más alto;
3. El ancho adecuado del voladizo - partesol y repisa reflectiva que permita la mayor obstrucción del ingreso de iluminación directa y maximice la cantidad de luz reflejada al interior.
4. Comprender si la disminución de la transmisión lumínica de la ventana es más efectiva para la mejora del confort lumínico del espacio interior que los dispositivos de control solar, o si un diseño óptimo unifica a ambos.

2. Confort térmico y lumínico en edificios

“Los parámetros ambientales o de confort, son aquellas características de un espacio determinado, que pueden valorarse en términos energéticos y que resumen las acciones que, en dicho espacio reciben las personas que lo ocupan, estos parámetros son medibles, de tal forma que se han instituido unidades físicas como herramientas para poder determinar las condiciones energéticas de un espacio determinado y de esta forma traducirlas en una respuesta arquitectónica” (López et al., 2018). Lograr la comodidad térmica y luminosa son algunas de las características más importantes en cualquier situación de trabajo. Por esta razón, es necesario estudiarlos por separado, así como sus interacciones (Bluyssen, 2012, p.46).

2.1. Confort térmico

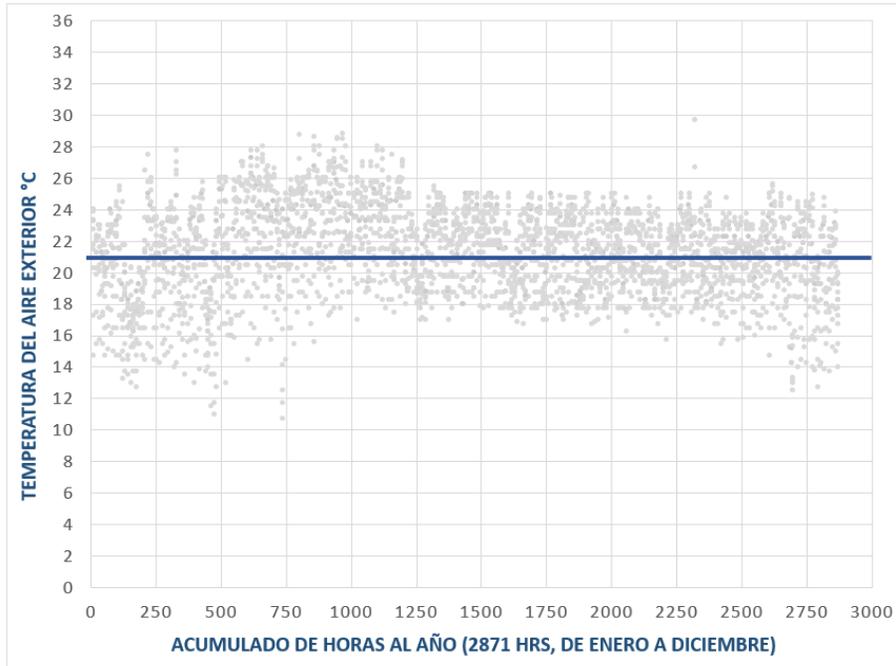
El confort térmico se logra equilibrando las pérdidas de calor y ganancias experimentadas por el cuerpo humano, controlando las condiciones ambientales, así el cuerpo humano ajusta sus funciones en consecuencia y responde de las condiciones ambientales dominantes. La zona de confort puede ser descrita como el punto en el cual el hombre puede adaptarse al ambiente con el gasto mínimo de energía. Es la sensación de bienestar con respecto a la temperatura, la cual depende de la relación constante que existe entre el calor producido por el ser humano y las pérdidas de calor de las superficies del entorno (Jara, 2015).

“La temperatura de un sistema está determinada por el promedio energía de los movimientos microscópicos de una sola partícula en el sistema por grado de libertad” (ANSI/ASHRAE, 2017). La temperatura del aire es el indicador comúnmente utilizado para evaluar el ambiente térmico, se puede medir en escala de Celsius, y se relaciona con el rendimiento de los usuarios en el interior de un espacio, se ha observado en diversos estudios que la motivación y capacidad de aprendizaje de una persona se ven reducidas cuando son sometidos a bajas, altas y repentinos cambios de temperatura Jara (2015). Para la sensación térmica de las personas, la temperatura media radiante es una de las variables importantes, esta es la temperatura de un recinto negro uniforme que intercambia la misma cantidad de calor por radiación con el ocupante como el entorno real, es un valor único para todo el cuerpo y representa tanto la temperatura media radiante de onda larga como la media de onda corta temperatura radiante.

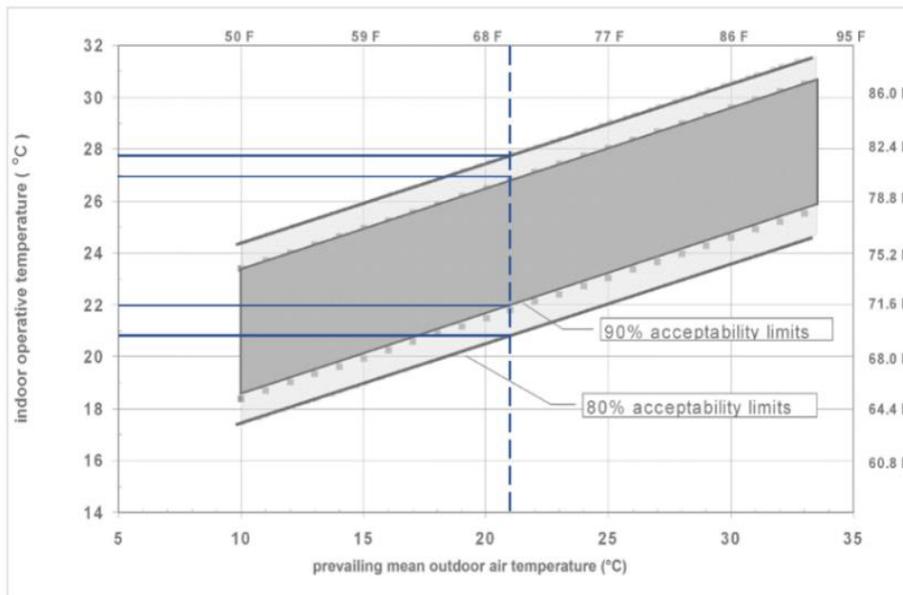
Así mismo, la temperatura operativa es la temperatura uniforme de un recinto negro imaginario, y el aire dentro de él, en el que un el ocupante intercambiaría la misma cantidad de calor por radiación y convección que en el ambiente no uniforme real Zambrano Prado (2013).

Mardaljevic (2014) describe que la teoría adaptativa de Dear y Brager, surgió como una técnica alternativa y mejorada para el análisis del confort térmico, ya que considera variables como los mecanismos de climatización, demografía y psicología, en donde sostiene que el ocupante interactúa con el ambiente, se adapta y lo modifica según sus preferencias y comodidades. Debido a que existe una tendencia a que la temperatura de neutralidad térmica aumente a medida que aumenta la temperatura exterior, lo cual se puede observar en edificios ventilados naturalmente. El modelo PMV podría sobreestimar la temperatura confort recomendada, especialmente en edificios con estrategias de diseño pasivas, ya que podría aumentar el consumo energético del edificio, y dimensionar de forma inadecuada las estrategias de diseño pasivas implementadas en un determinado clima y contexto. A partir de esto, se definió la base para el establecimiento del modelo adaptativo en los estándares internacionales como ASHRAE 55 (americano) y EN UNE 15251 (europeo).

Para la aplicación del modelo de confort térmico adaptativo de la normativa ASHRAE 55, se ha determinado la temperatura media del aire exterior durante el horario de ocupación de una oficina típica en la Ciudad de Guatemala, situada en latitud 14.58° y longitud -90.52° , en el altiplano central, el cual corresponde de enero a diciembre, de lunes a viernes, de 8h00 a 18h00 horas, dando como resultado un total de 2871 horas anuales de estudio. Durante este horario se obtiene una temperatura media exterior de 21°C , se puede visualizar de mejor forma la temperatura por horas en la gráfica 1. En la ciudad, se pueden observar tres temporadas diferenciadas del año: temporada fría, cálida y de lluvias; los meses más fríos y secos corresponden de noviembre a febrero; los más cálidos y secos, de marzo a mayo; los de mayores lluvias y temperatura más alta, de junio a octubre. Según la normativa ASHRAE (gráfica 2.), los límites de temperatura operativa aceptable para espacios acondicionados naturalmente, para lograr un 90% de confort térmico adaptativo, corresponden a un mínimo de 22°C y un máximo de 27°C . y para lograr un 80% de confort térmico adaptativo, corresponden a un mínimo de 21°C y un máximo de 28°C . Valores que utilizará el programa Design Builder más adelante para determinar la cantidad de horas que se salen de los límites de confort térmico.



Gráfica 1. Temperatura media del aire exterior en °C, durante las horas anuales de estudio (2871 hrs. de lunes a viernes de 8h00 a 18h00, desde enero a diciembre)



Gráfica 2. Límites de temperatura operativa aceptable para espacios acondicionados naturalmente. *Fuente:* ASHRAE 55-2017

2.2. Confort lumínico

Mardaljevic (2014) indica que el confort lumínico se logra cuando el ojo humano está en condiciones de leer un libro u observar un objeto rápido y fácilmente sin ningún tipo de estrés, la iluminación natural que ingresa a un espacio se constituye de varios recursos, la luz directa proveniente del sol, la luminancia del cielo que varía dependiendo del tipo de cielo, y las reflexiones de los elementos externos, a partir de estos factores es posible aumentar o disminuir la calidad de la iluminación natural del interior de un local. Los estándares de iluminación ofrecen recomendaciones para lograr una distribución óptima de la iluminación, niveles mínimos de iluminación, niveles de deslumbramiento aceptables, temperatura de color adecuada, valores de uniformidad de iluminación adecuados para diferentes tareas, evitación de sombras y reflejos de velo, y relaciones de luminancia adecuadas.

Entre los sistemas de evaluación de iluminación mínima y máxima aceptable se encuentra Annual Sunlight Exposure (ASE), que describe el potencial de incomodidad visual y de ganancia solar térmica en los ambientes interiores, ocasionado por el efecto de luz solar directa, así mismo, la métrica (SDA) mide la suficiencia de luz diurna para un área determinada, informando un porcentaje del área que excede un valor de iluminancia objetivo, durante un período de tiempo específico al año, también se encuentra Useful Daylight Illuminance (UDI), permite verificar la proporción del ambiente luminoso en valores útiles, dentro de un rango de iluminancias, al igual que un porcentaje de frecuencia durante un año, de acuerdo con fechas preestablecidas en el calendario. Palarino & Piderit (2020) muestra que los ocupantes prefieren un espacio con una variación en el patrón de luz natural, y donde tienen una iluminación de la tarea ligeramente mayor que la iluminación general del entorno, ya que su percepción visual puede mejorar, así mismo, establece límites que se basan en informes de preferencias y comportamientos de ocupación en oficinas con iluminación diurna con dispositivos de sombreado operados por el usuario, en donde el grado en que no se alcanza la UDI porque las iluminancias superan el límite superior es indicativo del potencial de molestias de los ocupantes, estos informes indican que, en situaciones prácticas tales niveles de iluminación de luz del día se consideran demasiado altos para la comodidad de los ocupantes, tanto visuales como termales. Así mismo, a partir de un estudio en espacios de trabajo de una empresa de distribución de hardware y software informático, donde cada una de las oficinas contenía al menos 2 computadoras, las mediciones mostraron que la mayoría de los empleados se sentían cómodos con

un nivel de iluminación de alrededor de 100 lux, a diferencia de las regulaciones estándar de los lugares de trabajo que exigían 300-500 lux a nivel de escritorio.

Además, los investigadores han notado que los ocupantes toleran niveles de iluminación hasta 1800lux, que son más altos que el nivel típico de iluminación en el plano de trabajo, a menos que haya deslumbramiento o sol directo frente a una estación de trabajo. Durante ese mismo experimento, se observó que el rango de iluminación de la luz del día de 700 lux a 1800 lux parecía ser aceptable tanto para las tareas de computadora o de papel. En consecuencia, cualquier iluminación diurna en el rango de 100 lux a 2000 lux debe considerarse como "útil" para la iluminación del espacio. Te Kulve et al., (2016) establece que la reflectancia útil de superficies interiores comprende lo siguiente (CEN, 2002a): techo: 0,6 a 0,9; paredes: 0,3 a 0,8; superficies de trabajo: 0,2 a 0,6; suelo: 0,1 a 0,5. Para obstrucciones externas fijas, Yang & Moon (2018) consideran una reflectancia de 0.50 a 0.60 para el concreto; para las ventanas, la transmitancia de luz visible es 0,70-0,79 según los códigos de estandarización chilenos.

2.3. Interacción del confort térmico y lumínico en la percepción del ser humano

Mardaljevic (2014) indica que, en situaciones prácticas los niveles de iluminación de luz del día que se consideran demasiado altos pueden repercutir en el confort tanto visual como térmico de los ocupantes. Huebner et al., (2016) indican que la fotobiología estudia la iluminación y su papel en la supresión de melatonina, activando el funcionamiento del sistema circadiano, estudios han demostrado que diferentes niveles de melatonina modifican la temperatura corporal, lo que influye en la preferencia térmica para un entorno. Esto sugiere que la estimulación de la iluminación tiene un papel indirecto en el confort térmico; el efecto principal es la supresión y síntesis de melatonina. Ahn et al., (2016) revelan que la observación principal es que la luz suprime la síntesis y liberación de la hormona pineal melatonina, otra observación prominente es el aumento de los temperamentos corporales cuando los individuos están expuestos a la luz brillante, en relación con aquellos cuando se exponen a la luz tenue, durante la noche. La melatonina puede estar implicada en la mediación de los efectos de la luz en la temperatura corporal, y el umbral para la supresión significativa de melatonina y la mejora de la temperatura podría estar cerca de 500 luxes.

Kulve, et al., (2016) también indican que la luz influye indirectamente en el comportamiento, sueño, cognición, trastornos afectivos estacionales, producción de melatonina, producción de cortisol y temperatura corporal central, ya que las vías neuronales que se activan por la luz y la temperatura se combinan en un modelo para mostrar las conexiones potenciales entre las respuestas visuales y térmicas, esto revela que ambos sistemas comparten el hipotálamo, aunque están conectadas a diferentes núcleos. La vía térmica está conectada al área preóptica medial, mientras que la vía de la luz está conectada al núcleo supraquiasmático. Aun así, la luz puede afectar a la termorregulación, así como, otras conexiones fisiológicas o psicológicas entre el sistema visual y el sistema térmico pueden conducir a respuestas térmicas inducidas por la luz.

Garretón et al., (2016) muestran que cuando las personas están en malestar térmico serán más propensos a experimentar molestias visuales, la tolerancia al deslumbramiento está relacionada con el confort térmico, estudios muestran que se tiene más tolerancia al deslumbramiento en invierno que en verano ya que cuando las personas están fuera de sus zonas de confort térmico, su sensación de deslumbramiento real no coincide con la del modelo de deslumbramiento predictivo, dando como resultado para el escenario de verano una percepción del deslumbramiento "perturbador" y en el escenario invierno "imperceptible". Lo cual sugiere que, si una persona está fuera de su zona de confort térmico, su percepción de deslumbramiento se verá afectada.

Yang & Moon, (2018) muestran que la influencia de la luz en las respuestas térmicas indica que se puede ahorrar energía cuando la luz mejora ya que el confort térmico también lo hará. A través de un estudio de campo en un edificio, se observó que al mejorar el confort visual se podría mejorar la percepción de satisfacción térmica de los ocupantes indirectamente, ya que la sensibilidad de la reacción a la temperatura depende del nivel de iluminación. Ishii y Horikoshi (1995) observaron que cuando la iluminancia es baja, la sensibilidad de la reacción a la temperatura era baja; además, con el aumento de la iluminación, la sensibilidad a la temperatura aumentó, 75-1500 luxes, así mismo, informaron que cuando la temperatura ambiente y la iluminancia se cambiaron de 28 a 25°C y 800-1500 luxes, respectivamente, los participantes se sintieron más cálidos, aunque la temperatura ambiente disminuyó.

Ochoa et al., (2012) revelan los resultados de una investigación sobre el impacto de la temperatura del color en el confort térmico en donde se muestra un mayor confort en espacios iluminados con baja temperatura de color de 2700 K. Este estudio demostró un efecto significativo de la luz en el confort térmico, ya que los participantes se colocaron más ropa bajo la luz de apariencia fría que bajo la luz de apariencia más cálida. También se mostró la importancia del género en la percepción de la comodidad térmica. Lo cual indica que al mejorar el confort visual de un espacio se mejora indirectamente el confort térmico, lo que podría repercutir en un menor consumo energético para climatización.

3. Estrategias pasivas de diseño de fachadas enfocadas a mejorar el confort térmico y lumínico del espacio interior

Se realiza una revisión de otras investigaciones enfocadas a mejorar el confort térmico y lumínico del espacio interior, para posteriormente identificar las multivariantes de estrategias pasivas de diseño de fachadas que destacan para la mejora del desempeño del confort térmico, en las cuales se encuentra la relación ventana-muro, la transmitancia térmica de ventana y muro; así mismo, las estrategias encontradas que prevalecen para la mejora del confort lumínico son los dispositivos de control solar. Es importante mencionar que, en su mayoría las investigaciones encontradas se enfocan ya sea en mejorar el confort térmico o lumínico por separado y no le dan importancia a evaluar las diferentes estrategias para lograr el confort térmico-lumínico de forma sinérgica.

Por lo tanto, en el capítulo 3.3 se describen metodologías de optimización que evalúan multivariantes que buscan alcanzar varios objetivos, ya que se considera que la mejor alternativa para esta investigación es precisamente el método de optimización a partir de dos objetivos: mejorar tanto el confort térmico como lumínico del espacio interior en edificios de oficinas en la Ciudad de Guatemala, de acuerdo con la integración adecuada de multivariantes de estrategias pasivas de diseño para fachadas desde una perspectiva sinérgica.

3.1. Estrategias de mejora del desempeño de confort térmico (*relación ventana-muro, transmitancia térmica de la envolvente*)

Alibaba (2016) advierte que, aunque las ventanas se utilizan para el contacto visual y para el ingreso de luz diurna en los espacios, tienen desventajas en climas cálidos, como la creación de puntos débiles en la piel del edificio para pérdidas o ganancias de calor. El área de una ventana es una decisión tomada por los diseñadores en las primeras etapas del diseño arquitectónico, por lo tanto, es difícil o imposible cambiarlo más tarde; se sabe que las ventanas tienen un efecto muy importante en el uso de energía del edificio. Pearson, et al., (2006) a través de una herramienta de simulación dinámica llamada DEROB-LH se demostró que el tamaño de las ventanas no es importante para la calefacción de invierno, pero es muy importante para satisfacer la demanda de refrigeración durante el verano.

Thalfeldt et al., (2013) describen la importancia que tienen las ventanas en la conexión física con el exterior y el uso de ventilación natural para controlar las condiciones de confort térmico para reducir las cargas de refrigeración. Además, indica que la elección de los sistemas de ventanas es muy importante para el ahorro de energía de la construcción debido al valor U y el coeficiente de ganancia de calor solar de las ventanas, ya que cuando las persianas venecianas se instalan en las ventanas en climas tropicales, la satisfacción de las personas que están sentadas junto al vidrio depende del nivel de radiación solar que incide sobre el cuerpo. Pino et al., (2012) encontró que al utilizar el software EDSL Tas para una fachada totalmente acristalada en Santiago, la demanda de energía de refrigeración y calefacción puede alcanzar los 115 kWh/m² en un año. Además, si la relación ventana-muro es del 20% con protección solar externa y acristalamiento seleccionado, la demanda de refrigeración y calefacción será de 25 kWh/m². Si se aplica ventilación nocturna durante los períodos de enfriamiento, se logrará una reducción adicional del 37%.

Košir et al., (2018) realizaron un estudio en Ámsterdam, Holanda de las relaciones de ventana-muro del 10% al 100% a intervalos del 10% de cuatro orientaciones principales. La ventana utilizada en esta obra se encontraba en el centro de la pared externa y era de doble acristalamiento sin ningún dispositivo de sombreado. Como resultado de este trabajo, se llegó a la conclusión de que no se deben utilizar grandes ventanas porque proporcionan transferencia de calor durante los períodos de invierno y verano.

(De la Paz, 2012, p. 88) realizaron un estudio en una zona de clima frío de Estonia, se determinó que la relación óptima de ventana a pared externa fue del 40% y del 60%. Además de esto, la solución de fachada óptima era altamente costosa, ya que debería optar por vidrio triple transparente, de baja emisividad con una relación ventana a pared externa del 25% y el aislamiento de pared externa de 200 mm (U a 0,16). Las simulaciones limitadas estudiadas en Europa Central concluyeron que una relación ventana a pared externa del 40% con triple acristalamiento y recubrimiento de doble baja emisividad conduce a un costo óptimo.

(Jiménez, 2015) sugieren que la absorción solar de la envolvente del edificio puede tener un efecto significativo en el uso total de energía interior para mantener el confort, ya que temperatura de la superficie externa de la envolvente del edificio está sustancialmente influenciada por el flujo de calor solar radiante recibido y la absorción solar de la superficie. El rendimiento de la envolvente del edificio es entre otros factores, principalmente determinado por la transmitancia térmica, que influye en la intensidad del flujo de calor conductor, sin embargo, un factor importante y a menudo pasado por alto, que también afecta a la transferencia de energía térmica a través de la envolvente del edificio, es el flujo de calor radiante recibido externamente, estrechamente vinculado a la intensidad de la radiación solar y las características ópticas de la superficie.

3.2. Estrategias pasivas de mejora del desempeño de confort lumínico (*dispositivos de control solar*)

“El Sol y su alta incidencia en altitudes bajas, regiones tropicales y subtropicales, hace que una de las estrategias prioritarias de la arquitectura bioclimática sea el control solar” (Faisal & Aldy, 2016). En los últimos años, se ha ignorado el potencial de los elementos de sombreado eran la práctica central de la arquitectura, grandes arquitectos de la historia entendieron que los mismos, no solamente solucionan un importante problema funcional, sino también provocan una expresión estética muy fuerte. Fue precisamente Le Corbusier, exponente más visible del Movimiento Moderno, quien se dio cuenta de esta realidad, y promulgó el control de la radiación solar, de la ventilación, humedad, construcción con materiales autóctonos en la arquitectura Faisal & Aldy (2016). Un esfuerzo para reducir el uso de energía es la utilización de los elementos de sombreado en las fachadas del edificio. El aire acondicionado requiere mucha energía puede ser reemplazado

por ventilación natural utilizando elementos arquitectónicos que pueden reducir el sobrecalentamiento del edificio. El ajuste de la radiación solar que entra en el edificio es un paso importante en el proceso de enfriamiento pasivo para obtener la condición de confort térmico Jiménez (2015).

Zambrano Prado (2013) En su investigación sobre la tipología de elementos de sombreado de edificios en el corredor Jalan Sudirman en Pekanbaru indican que, si la orientación y la apertura no son opcionales debido a las necesidades de diseño, entonces los dispositivos de sombreado son muy importantes, estos se pueden diseñar de acuerdo con la posición y la dirección de la llegada de la radiación solar para que la apertura pueda protegerse de la radiación directa. El dispositivo de sombreado es capaz de bloquear la radiación solar directa y reducir la influencia de la iluminación indirecta que es la reflexión del cielo y el nivel del suelo, de acuerdo con la posición del sol se determina el ángulo de incidencia de la luz solar en la superficie del vidrio (penetración). Cuando el ángulo de incidencia de la luz solar es igual al ángulo de la sombra que formó dispositivo de sombreado, la luz solar directa se puede conducir con eficacia. Por lo tanto, la posición de la luz solar y la profundidad del dispositivo de sombreado se convierte en un factor muy importante. Los dispositivos de sombreado se dividen en dos tipos basados en la aplicación, el sombreado interno y el sombreado externo. El sombreado interno es un elemento interior en las ventanas interiores, estos dispositivos generalmente pueden ser ajustables, por lo tanto, el sombreado puede ser a través de persianas, cortinas y otros. Los dispositivos de sombreado externos pueden reducir la energía térmica de manera efectiva para anticipar y reducir la radiación antes de las superficies de vidrio, estos a su vez, pueden ser divididos en 2 tipos, dispositivos fijos y dispositivos ajustables, en la categoría de dispositivos de sombreado fijo se pueden encontrar, los voladizos, partesoles verticales, las combinaciones de elementos horizontales y verticales, así como el balcón, las repisas de luz y entre los ajustables se encuentra el louvre por encima de la ventana.

De la Paz, (2012) indica que en el diseño de un sistema de control solar es importante tomar en cuenta la dimensión de la protección, el objetivo es encontrar la dimensión adecuada para protegerse del período más caluroso, para esto existe un ángulo que varía según la orientación del vano a proteger y que vendrá dado por cada región climática, así mismo, todos los sistemas de sombreado consistirán en voladizos horizontales, partesoles verticales o una combinación de ambos.

Asadi et al., (2012) indica que el voladizo como dispositivo de protección solar convencional puede ser clasificado en función de su ubicación como interno o externo, los voladizos son los elementos de control solar más efectivos cuando el sol está alto. Los voladizos horizontales y aleros tienen la ventaja de bloquear por completo la luz directa del sol sin impedir las vistas durante todo el año. Para evitar que el dispositivo adquiera demasiado tamaño, se deben crear configuraciones optimizadas en función de su aplicación.

Gasparella et al., (2011) indica que los partesoles hacen referencia a cualquier elemento que sobresale del plano de fachada del edificio, dentro de esta clasificación se pueden encontrar variables como las lamas horizontales o verticales. Es de vital importancia definir adecuadamente los ángulos, dimensiones y espaciamiento entre estos dispositivos, según la orientación de fachada; estudios evidencian que la combinación de ambos elementos horizontales y verticales para todas las orientaciones, logran la protección directa de los rayos solares, el calentamiento interior, el efecto invernadero, el deslumbramiento y el inconfort del ambiente interior del edificio.

3.3. Métodos de optimización de fachadas en función de lograr más de un objetivo

Las estrategias pasivas de diseño para fachadas comprenden formas importantes de reducir el consumo de energía de calefacción, refrigeración e iluminación de los edificios. El diseño óptimo de los edificios suele tener en cuenta objetivos múltiples y competitivos como la minimización simultánea del consumo de energía o el impacto medioambiental. El frente de Pareto consiste en una herramienta adecuada para esta evaluación, ya que estudia varios objetivos simultáneamente y uno de los usos principales es la optimización del diseño solar pasivo de los edificios. Asadi et al., (2012) desarrollan un método de optimización de un edificio a través del software de simulación de energía GenOpt, la investigación inicia con la descripción de los parámetros de construcción, la plantilla de entrada de simulación y la función objetivo. A continuación, GenOpt comienza a escribir automáticamente los archivos de entrada para el programa de simulación, ejecutar las simulaciones, recopilar los resultados y, en función de los resultados de la simulación, determinar el nuevo conjunto de archivos de entrada para la siguiente ejecución, hasta que se cumpla el objetivo.

Gasparella et al., (2011) realizan un estudio de optimización mediante una reciente herramienta de modelado de luz diurna basada en el clima, EvalDRC, para averiguar el área necesaria para la reflexión de luz diurna en una película de micro prisma, mientras se minimiza el área de acristalamiento. El rendimiento de una ventana en términos de autonomía de luz diurna espacial (sDA) se optimiza por su geometría y propiedades ópticas. Los datos implementados en el modelo de simulación se recopilan a través de mediciones in situ y mediciones de gonio de la función de distribución bidireccional-dispersión. En el análisis se estudia un área de ventana de 0,90 m a 1,80 m de altura que proporciona vista al exterior. La zona superior de 1,80 m a 3,60 m se divide en seis áreas de 0,30 m de altura en tres enfoques de optimización. En primer lugar, el tamaño del acristalamiento transparente se reduce gradualmente para encontrar la relación ventana-pared más pequeña y aceptable. En segundo lugar, las películas de micro prisma se aplican a una fracción de variación incremental del área acristalada inicial para determinar la relación mínima película-ventana.

Leskovar & Premrov, (2011) desarrollaron un esquema basado en la simulación para optimizar el costo, ahorro de energía y confort térmico en los edificios residenciales durante su remodelación. El esquema combina el procedimiento TRNSYS, GenOpt y Tschebycheff para la optimización multi-objetivo, mientras que las variables de diseño representaron una amplia selección de alternativas para el aislamiento de pared externa, de techo, tipos de ventanas, así como la instalación de un colector solar en el edificio existente. El estudio de caso de una casa unifamiliar adosada en Portugal sirve para ilustrar claramente grandes diferencias en las soluciones óptimas dependiendo de la elección del objetivo durante la optimización: coste de adaptación, ahorro de energía o porcentaje de horas de incomfort, y para demostrar aún más que las soluciones que conducen a un mayor ahorro de energía no necesariamente conducen a un mejor confort térmico.

Ochoa et al., (2012) estudian la influencia del tipo de ventanas y el tamaño en las necesidades de energía de calefacción y refrigeración, así como las cargas máximas para un estudio de caso de una casa unifamiliar bien aislada, de dos plantas situada en Milán, Italia. El estudio paramétrico se realiza con TRNSYS, con tipo de acristalamiento, tamaño de ventanas, presencia de sombreado, orientación del edificio y ganancias internas como variables de diseño, después de esto se utiliza la regresión lineal múltiple para revelar los parámetros más influyentes.

(CEPAL, NDF, BID, 2018) estudian las proporciones óptimas de ventana-muro minimizando la carga total anual de calefacción y refrigeración para un estudio de caso de una casa de dos plantas con sistema estructural prefabricado de estructura de madera, situado en Liubliana, Eslovenia. La casa está bien aislada con elementos de envolvente opaca que tienen valor U entre 0.102 y 0.135Wm⁻²K⁻¹, utilizando triple acristalamiento de baja emisividad, voladizos en el sur y dispositivos de sombreado vertical externo en las fachadas oeste y este. El estudio paramétrico con las variables de diseño siendo las relaciones ventana-pared en cada fachada, tres sistemas de macro-panel de estructura de madera y la orientación del edificio. Los resultados indican que la relación óptima ventana-muro para muros con valores U muy bajos es menor que en paredes con valores U más altos, y los autores derivan una interpolación lineal que predice la demanda de energía aproximada basada en el valor U de pared y la relación ventana-muro.

(Kazanasmaz et al., 2016) desarrollan una herramienta conceptual para diseñar fachadas compatibles con códigos energéticos en climas cálidos, la cual, se combina con EnergyPlus, para la simulación de energía y es adecuada para la optimización el diseño de la fachada a través de la interacción con el usuario. Las variables de diseño que utilizan son la ubicación, orientación y transparencia de la fachada, el uso previsto del espacio interior, mientras que el sistema sugiere soluciones alternativas de fachada que consisten en el valor U de la pared, el tamaño de la ventana, el tipo de acristalamiento, el tipo de sombreado y control, la presencia de la estantería de luz, la tasa de ventilación nocturna y el control de iluminación. Chua & Chou (2010) determinan la combinación óptima de dispositivos de sombreado externos y tipos de acristalamiento para una reducción rentable de la carga de refrigeración para dos estudios de caso de edificios residenciales de gran altura, ubicados en Singapur. El estudio paramétrico se realiza en eQUEST y las variables de diseño son nueve tipos de dispositivos de sombreado externos, cuatro tipos de acristalamiento y dos orientaciones de construcción.

Según Luddeni, Krarti, Pernigotto y Gasparella (2018) Harkouss, Fardoun y Biwole (2018), las estrategias pasivas de mayor importancia en el diseño de un edificio de energía neta zero (NZEB), es la ventilación e iluminación natural, aislamiento de la envolvente, dispositivos de protección solar, siendo estrategias directamente relacionadas a mejorar el confort térmico y visual del espacio interior. Estudios muestran que el edificio de oficinas en Pakvaenget, tuvo un consumo total de energía de 55,4 kWh / m² al año después de su modernización.

Así mismo, una oficina en Rockwool tuvo un consumo total de energía inicial fue de 264 kWh/m² al año, después de la remodelación, redujo el consumo de energía en un 84% obteniendo 41,2 kWh/m² de consumo al año. Ambos edificios basaron sus estrategias de mejora en estrategias pasivas de los NZEB y en la implementación de energía renovable.

4. Contexto de estudio

4.1. Clima en la Ciudad de Guatemala



Fig. 1. Localización de la Ciudad de Guatemala

Guatemala se encuentra ubicada en la franja de climas cálidos con predominio de temperaturas elevadas y clima tropical estacional. La Ciudad de Guatemala está situada en latitud 14.58° y longitud -90.52° . Así mismo, se encuentra ubicada en el altiplano central, con un perfil montañoso y una cobertura selvática. Se pueden observar tres temporadas diferenciadas del año: temporada fría, cálida y de lluvias; los meses más fríos y secos corresponden de noviembre a febrero; los más cálidos y secos, de marzo a mayo; los de mayores lluvias y temperatura más alta, de junio a octubre. La distribución de la temperatura en el país está determinada por el comportamiento de los gradientes de temperatura influidos por la elevación de las zonas geográficas. La temperatura media anual para la zona central muestra valores de 18°C (Palarino & Piderit, 2020).

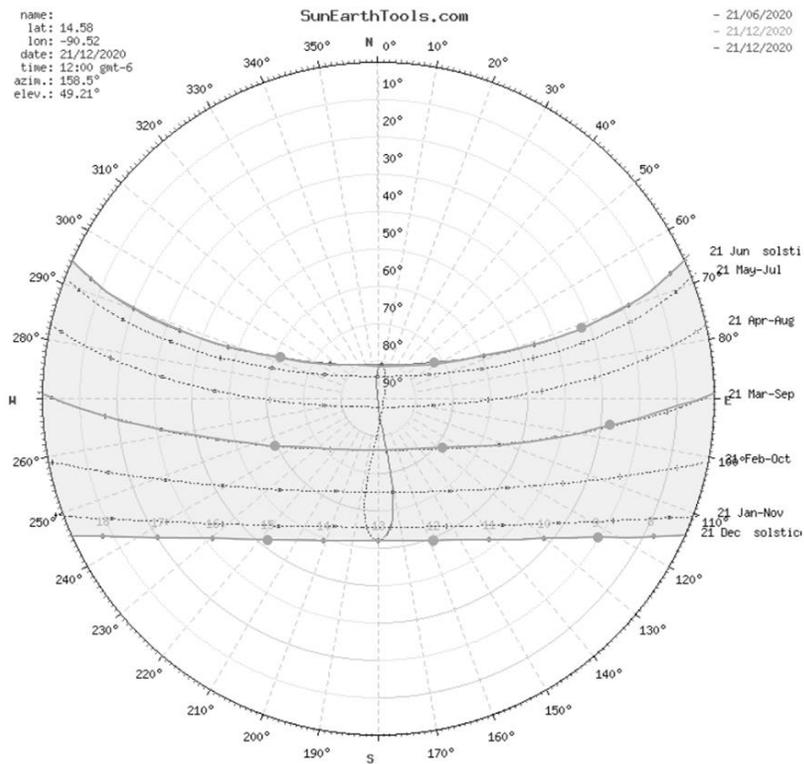
Humedad relativa y vientos

De marzo a mayo la humedad relativa se encuentra entre 30-70%; la velocidad del viento llega hasta 12 m/s desde el noreste y hasta 10 m/s desde el suroeste. El viento de mayor predominancia proviene del norte y sur en el horario de ocupación de 8:00 a 18:00. En junio a octubre la humedad relativa se mantiene arriba del 70%; la velocidad del viento llega hasta 12 m/s desde el noreste y 8 m/s desde el suroeste y sureste. El viento de mayor predominancia proviene del norte y noreste en el horario de ocupación de 8:00 a 18:00. De noviembre a febrero la humedad relativa se mantiene entre 30 y 70%; la velocidad del viento alcanza hasta 14 m/s desde el norte y 10 m/s desde el suroeste. El viento de mayor predominancia proviene del norte y noreste en el horario de ocupación de 8:00 a 18:00. Las velocidades de viento más altas se observan en los meses de diciembre, enero, febrero, ya que en promedio se mantienen entre 3 a 9 m/s.

Radiación solar

El aprovechamiento de la energía solar está directamente ligado a la situación geográfica del lugar y de las variaciones temporales, condicionado principalmente por tres aspectos: la intensidad de la radiación solar recibida por la Tierra, los ciclos diarios y anuales a los que está sometida y las condiciones climatológicas de cada lugar. La ciudad de Guatemala está a una altura de 1 458 msnm, y con una variación de declinación solar en todo el país, a través del año entre 23° y -23° , lo cual permite que siempre reciba radiación solar debido a su ubicación en el globo terráqueo; Guatemala es un país con un gran potencial solar que, debido a su posicionamiento geográfico, el valor promedio de radiación solar global para todo el país es de 5.3 kWh/m² al día.

El 21 de marzo a las 9:00 horas, la ubicación del sol tiene un azimut de 102.97° y una altitud 40.91° , para las 12:00 horas, tiene un azimut 170.33° y una altitud de 75.25° y para las 15:00 horas tiene un azimut -105.29° y una altitud de 45.51° . El 21 de junio a las 9:00 horas, la ubicación del sol tiene un azimut de 71.21° y una altitud 45.87° , para las 12:00 horas, tiene un azimut 5.63° y una altitud de 81.10° y para las 15:00 horas tiene un azimut -71.06° y una altitud de 47.60° . El 21 de diciembre a las 9:00 horas, la ubicación del sol tiene un azimut de 130.25° y una altitud 31.94° , para las 12:00 horas, tiene un azimut -179.88° y una altitud de 52.00° y para las 15:00 horas tiene un azimut -130.14° y una altitud de 31.82° .



Gráfica 3. Carta Solar de la Ciudad de Guatemala

Fuente: Elaboración propia con base a https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es

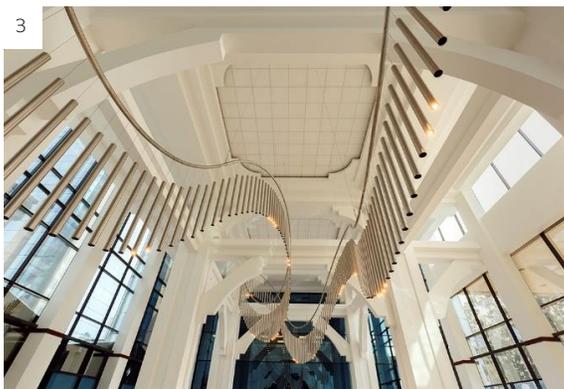
4.2. Casos de estudio de edificios en Guatemala

EDIFICIO HEIDELBERG		Ficha No. 1
Construcción: Remax		
1		2
		
3		4
		
<p>Información del proyecto</p> <p>Ubicación: 11 Calle 7-66 Zona 9, Guatemala Destino: Oficinas Año de construcción: 2018 Superficie Terreno: ≈720 m² Superficie construida: ≈8640 m² Altura total: ≈48 m No. De pisos: 12 No. Sótanos: 6</p>		<p>Descripción del edificio</p> <p>Materialidad de fachadas: Vidrio simple reflectivo color azul. Transmitancia térmica de envoltente: ≈5 W/m²K Acristalamiento de envoltente: 100% Operabilidad de ventanas: 0% Elementos de control solar: Ninguno Ventilación: Mecánica Climatización: Aire acondicionado</p>
<p>Fuentes: 1. Google earth. 2.https://remax-premium.com.gt/propiedad/80 3.-4.http://ventanasalemanas.com/proyectos/item/115-heidelberg-centro-corporativo</p>		

EDIFICIO EUROPLAZA

Ficha No. 2

Construcción: Inversiones Inmobiliarias El Bosque S.A.



Información del proyecto

Dirección: 5a. Avenida 5-55, zona 14, Guatemala
 Destino: Oficinas
 Año de construcción: 1999
 Superficie Terreno: ≈11,680 m²
 Superficie de cada torre: ≈900 m²
 Superficie construida: ≈139,354 m²
 Altura total: 72m
 No. De pisos: 20 (4 torres interconectadas)
 No. De sótanos: 4

Descripción del edificio

Materialidad de fachadas: Vidrio simple reflectivo color azul.
 Transmitancia térmica de envolvente: ≈5 W/m²K
 Acristalamiento de envolvente: 100%
 Operabilidad de ventanas: 0%
 Elementos de control solar: Ninguno
 Ventilación: Mecánica
 Climatización: Aire acondicionado

Fuentes: 1. Google earth. 2. <https://www.easybroker.com/gt/inmueble/alquiler-de-oficina-en-europlaza-zona-14-b03acfee-5c8e-4645-af34-6b2c069ebcfc> 3. <https://www.oliveroblandstudio.com/es/proyectos-detail/2017/3/26/9ugamwp5zukvh93dgtzdy971uvnhl9-532rg> 4. <https://www.easybroker.com/gt/inmueble/oficina-en-renta-edificio-europlaza-torre-ii-zona-14>

EDIFICIO INTERAMÉRICAS

Ficha No.3



Información del proyecto

Ubicación: Diagonal 6 10-50, zona 10, Guatemala
 Destino: Oficinas
 Año de construcción: 2012
 Superficie Terreno: ≈5,487.00 m²
 Superficie construida: ≈51,847 m²
 Superficie de cada torre: ≈900 m²
 Altura total: 80 m
 No. De pisos: 21 (2 torres)
 No. De sótanos: 7

Descripción del edificio

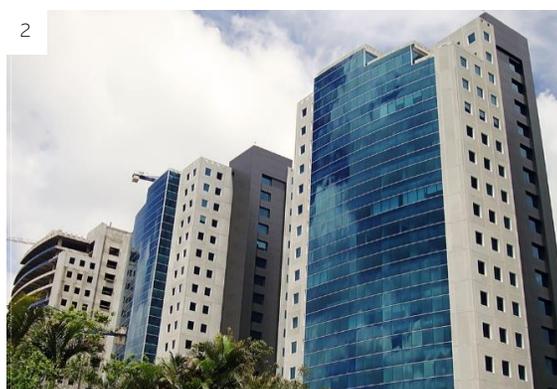
Materialidad de fachadas: Vidrio simple reflectivo color azul.
 Transmitancia térmica de envolvente: ≈ 5 W/m²K
 Acristalamiento de envolvente: 100%
 Operabilidad de ventanas: 0%
 Elementos de control solar: Ninguno
 Ventilación: Mecánica
 Climatización: Aire acondicionado

Fuentes: 1. Google earth. 2.<https://www.inmobiliaria-asesco.com/property/oficinas-en-renta-zona-10> 3.-
 4.<https://www.istockphoto.com/es/foto/moderno-edificio-de-oficinas-en-la-ciudad-de-guatemala-edificio-interamericas-centro-gm1183600527-332850173>

ZONA PRADERA

Ficha No.4

Arquitectura: Pelayo Llarena / Desarrollo: Multiproyectos



Información del proyecto

Ubicación: Blvd. Los Próceres 24-69 Z-10, Guatemala
 Destino: Oficinas
 Año de construcción: 2010
 Superficie Terreno: ≈ 21880 m²
 Superficie construida: ≈ 120, 680 m²
 Superficie de cada torre: ≈ 1,380 m²
 Altura total: 84 m
 No. De pisos: 19
 No. De sótanos: 6
 Cantidad de elevadores: 32

Descripción del edificio

Materialidad de la envolvente: Vidrio simple reflectivo color azul en fachada noroeste y sureste. Concreto en muros de fachada noreste y suroeste.
 Transmitancia térmica de envolvente: ≈ 5 W/m²K en acristalamiento.
 Acristalamiento de envolvente: ≈ 95% en fachada noroeste y sureste; ≈ 40 % en fachada noreste y suroeste.
 Operabilidad de ventanas: 0%
 Elementos de control solar: Voladizos de ≈0.5 m de proyección en fachada noroeste y sureste
 Ventilación: Mecánica
 Climatización: Aire acondicionado

Fuentes: 1. Google earth. 2.<https://www.flickr.com/photos/21313540@N05/4792452674> 3. <https://www.pinterest.cl/pin/531706299734809602/> 4.<https://www.skyscrapercity.com/threads/zona-pradera-5-edificios-4-x19p-1x6p-6s-zona-10-cd-de-guatemala.737616/page-171>

EDIFICIO PLATINA

Ficha No. 5

Construcción y desarrollo: Activa



Información del proyecto

Ubicación: 5a Avenida, 16-62, Zona 10, Guatemala
 Destino: Oficinas
 Año de construcción: 2011
 Superficie Terreno: ≈ 1,400 m²
 Superficie construida: ≈ 7,500 m²
 Superficie de la torre: ≈ 1,020 m
 Altura total: 62 m
 No. De pisos: 14
 No. De sótanos: 6.5

Descripción del edificio

Materialidad de la envolvente: Vidrio reflectivo azul de doble capa hermética. Muros exteriores de concreto.
 Transmitancia térmica de envolvente: ≈ 2 W/m²K en acristalamiento.
 Acristalamiento de envolvente: ≈ 95% fachada este; ≈ 90% fachada norte; ≈ 50% fachada oeste y sur.
 Elementos de control solar: Celosía en ciertas zonas de fachada este, oeste y sur.
 Ventilación: Sifones de ventilación (en ciertas zonas) y mecánica.
 Climatización: aire acondicionado

Fuentes: 1. Google earth. 2. <https://www.desarrollosactiva.com/platina> 3. <https://www.skyscrapercity.com/threads/platina-business-center-%E2%94%82-14-niveles-6-5-sotanos%E2%94%82-zona-10-%E2%94%82-cd-de-guatemala.620936/page-20> - 4. <https://www.desarrollosactiva.com/platina>

EDIFICIO ATLANTIS

Ficha No. 7

Arquitectura: Minondo & Gieseman / Solares & Lara



Información del proyecto

Ubicación: 13 Calle, 3-40, zona 10
 Destino: Oficinas
 Año de construcción: 1991
 Superficie Terreno: 2,800 m²
 Superficie construida: 38,000 m²
 Altura total: 70 m
 No. De pisos: 19 niveles
 No. sótanos: 5
 Cantidad de elevadores: 6

Descripción del edificio

Materialidad de la envolvente: Vidrio reflectivo azul de doble capa hermética y difusora de calor. Loza de granito.
 Transmitancia térmica de envolvente: 1.8 W/m²K
 Acristalamiento de envolvente: 100%
 Elementos de control solar: Ninguno
 Ventilación: Ventilación natural (en ciertas zonas) y aire acondicionado.

Fuentes: 1. Google earth. 2. - 4. <https://edificioatlantis.com.gt/galeria/>

Entre las características en común que se encontraron en los edificios estudiados en Guatemala, se puede concluir son oficinas de planta libre, en su mayoría se encuentran entre los 900 a 1400 m² de superficie de planta. Todos utilizan sistema mecánico de ventilación y climatización, no cuentan con ventanas operables, así mismo, tienen porcentaje arriba del 90% de acristalamiento reflectivo en la mayoría de sus fachadas, y escasez de elementos de control solar, siendo ésta última la principal estrategia que debería utilizarse en regiones tropicales. En la actualidad, en la Ciudad de Guatemala se ha implementado arquitectura, tecnología, materiales y tendencias de diseño importadas desde otras latitudes, las cuales demandan un alto consumo de energía para refrigeración e iluminación y no garantizan necesariamente el confort térmico y lumínico interior de los edificios.

4.3. Normativas de construcción en la Ciudad de Guatemala

La normativa que rige la construcción en Guatemala es el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), en donde se establece una serie de parámetros a partir de la densidad futura de la ciudad. Para determinar qué permite el POT realizar dentro de un predio específico es necesario localizarlo dentro del Mapa POT para identificar la zona general aplicable. Para ello será necesario contar con cualquiera de los siguientes datos con la dirección exacta del predio, o número de finca, folio y libro del predio de acuerdo con su inscripción en el Registro General de la Propiedad y que se encuentre registrado en la Dirección de Catastro, o el número catastral del predio.

La mayoría de los edificios de oficinas en la ciudad se encuentran ubicados en la zona 10, en parcelas determinadas como zonas de alta intensidad (G5). La zona G5, son aquellas áreas que por su colindancia con las vías de mayor acceso del municipio se consideran aptas para edificaciones de muy alta intensidad de construcción, en las que predominan la vivienda multifamiliar y los usos del suelo no residenciales compatibles con la vivienda, estos predios se señalan en rojo en el mapa 1.

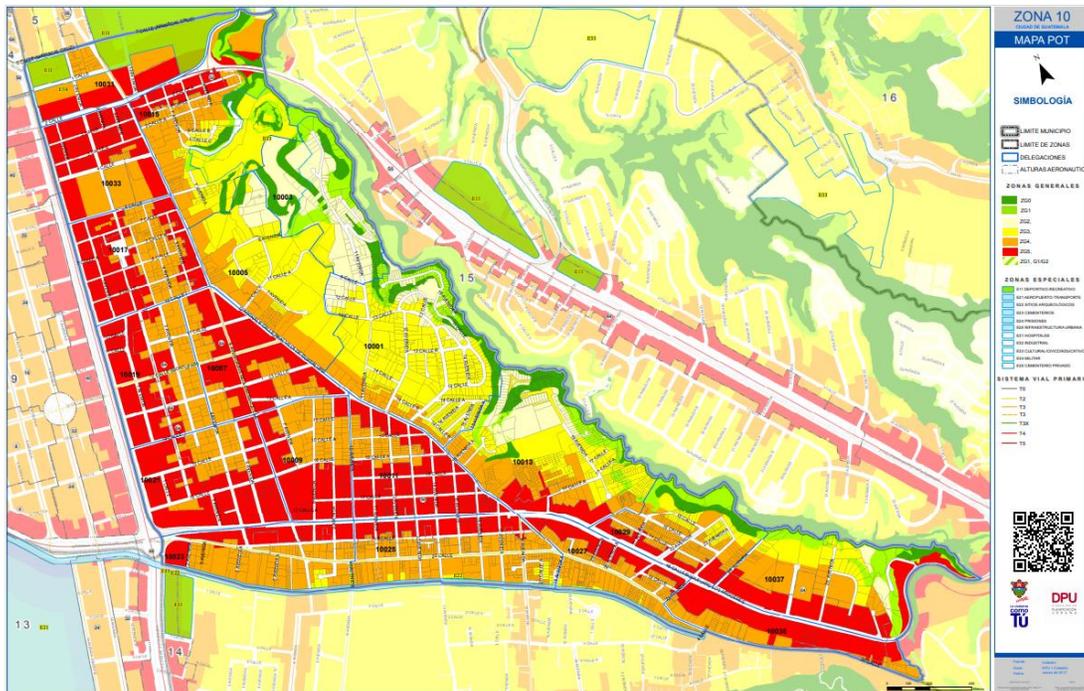


Figura 2. Cartografía de Plan de Ordenamiento Territorial. Fuente: <http://pot.muniguate.com/mapas/down/z1.php>

El procedimiento ante la Dirección de Control Territorial [DCT], es el procedimiento directo al que se puede optar para obtener una autorización municipal en la cual la Dirección de Control Territorial extiende inmediatamente su aprobación si el proyecto cumple con estos parámetros normativos, brindando al desarrollador absoluta certeza de aprobación. Los requerimientos indicados en la tabla 1, son los que se exigen en la zona G5.

Frente de predio [F]: Es la longitud mínima que debería tener la parcela, en función de su colindancia con el espacio vial, en este caso, para la zona G5, debería de estar sobre los 21 metros de longitud.

Superficie efectiva de predios [S]: Indica el área del predio edificable, según la zona general aplicable, es decir, a partir de los parámetros que se muestran a continuación, se determinará un área construable dentro de la parcela, la cual, deberá ser mayor a 600 metros cuadrados según normativa.

Índice de edificabilidad base [IEb]: Indica la intensidad de construcción que tiene o que puede tener un edificio, aplicable a ese proyecto. En este caso se establece un índice de edificabilidad entre 6 y 9, lo cual corresponde a la cantidad de veces que puede estar multiplicada la superficie efectiva del predio.

Altura base [ab]: Altura medida en metros que como máximo puede alcanzar una edificación o estructura según el índice de edificabilidad base. Para la zona G5 se establece un máximo de altura de 56 metros.

Porcentaje de permeabilidad [%P]: Es el indicador de la superficie permeable del suelo con que debe contar un predio. Para la zona G5 no se requiere porcentaje de permeabilidad en el predio.

Bloque inferior [bi]: Es el volumen de una edificación que sobresale de la superficie exterior del suelo. *Altura de bloque inferior [hbi]:* Altura medida en metros que, como máximo puede alcanzar el bloque inferior de un edificio o una estructura hasta la altura que establece el POT, para este caso la altura máxima que se establece es de 16 metros.

Bloque superior [bs]: Es el volumen de una edificación por encima del bloque inferior, hasta la altura que establece el POT. *Altura de bloque superior [hbs]:* Altura medida en metros que puede alcanzar el bloque superior de un edificio o estructura, para este caso se establece una altura máxima de 40 metros sobre los 16 metros del bloque inferior.

Separaciones a colindancias [SC]: Distancia mínima que debe mantenerse entre el bloque inferior y superior de una edificación o estructura, a los linderos de los predios vecinos y alineaciones municipales. Para la zona G5, no se establece mínimo de separación a colindancia para el bloque inferior, y para el bloque superior se establece un mínimo de 5 metros de separación.

Distancia de lados mínimos de patios y pozos de luz [DPP]: Dimensión mínima que debe existir entre los lados opuestos o adyacentes más cercanos de un patio o pozo de luz. El lado mínimo del pozo de luz se calcula multiplicando $\frac{1}{4}$ por la altura del bloque inferior que es de 16m, dando como resultado 4m. Para el bloque superior es $\frac{1}{8}$ parte de la altura de este bloque. En este caso esta dimensión es de 56m, dando como resultado 7 m.

Uso de suelo mixto [USM]: Superficie edificada que tiene un porcentaje mínimo residencial y el resto no residencial. Para este caso se deberá estimar un 25% de área para otro tipo de actividades como comercio, gimnasio, restaurante, galerías, u otro.

Tabla 2. Parámetros del Plan de Ordenamiento Territorial POT para zona G5 y configuración de modelo teórico inicial

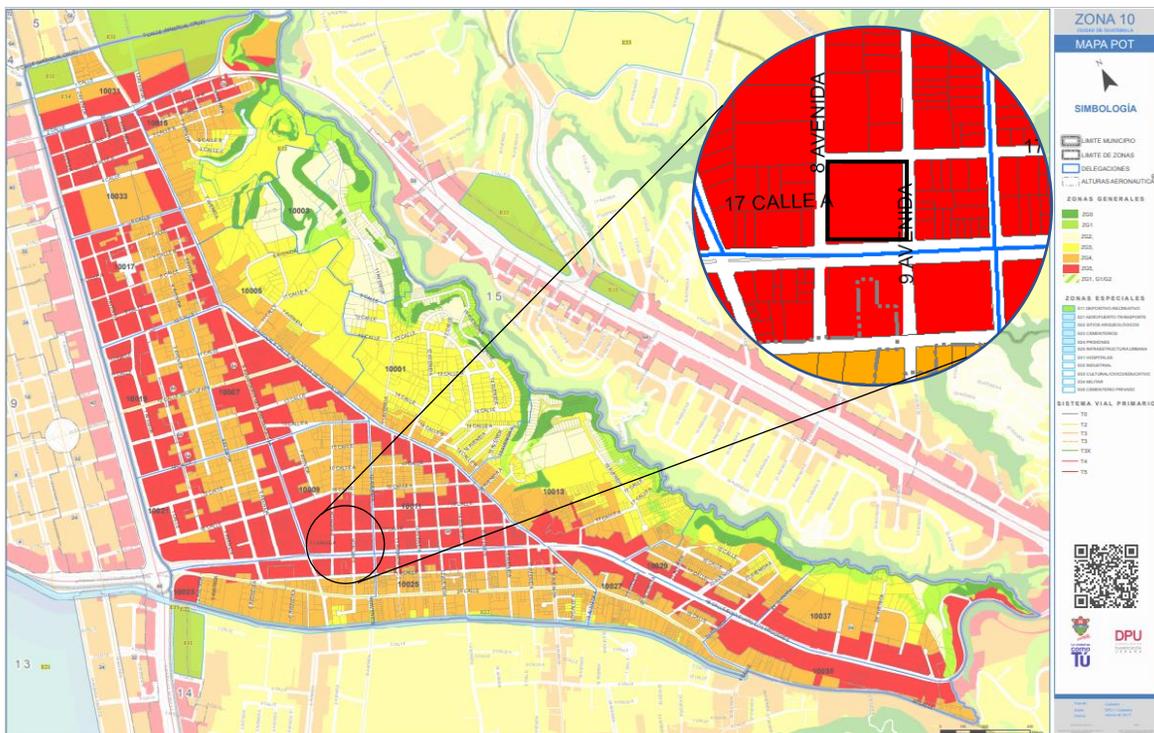
Descripción	Unidad	Requerimiento (DCT)	Configuración de modelo teórico inicial
Frente de predio	m	21 ~	25 / 49
Superficie efectiva de predios	m ²	600 ~	1225
Índice de edificabilidad	relación	> 6.0 ~ 9.0	9
Altura (aeronáutica)	m	56	56
Porcentaje de permeabilidad	%	0 ~	15.58
Altura bloque inferior	m	~ 16	-
Separación a colindancia del bloque inferior	m	0 ~	7
Lado mínimo de pozo de luz del bloque inferior	relación	1/4 h ~	-
Separación a colindancia del bloque superior	m	5 ~	7
Lado mínimo de pozo de luz del bloque superior	relación	1/8 h ~	-
Uso de suelo	%	25% mixto	0.25

5. Diagnóstico y mejoramiento del desempeño térmico-lumínico de edificios de oficinas

5.1. Diagnóstico de desempeño térmico-lumínico de modelo teórico inicial

5.1.1. Construcción de modelo teórico inicial

A continuación, se define un predio aleatoriamente de 93 x 93 metros, ubicado en el área de alta densificación futura o zona G5. En donde el ancho de vía es de aproximadamente 16 metros, para la calle 17A, así como para la 8va. y 9na. avenida. Se establecen 8 metros de frente municipal para cada lado del predio, debido al requerimiento normativo para sistema vial primario T3. De acuerdo con las características en común que se encontraron en los edificios estudiados en Guatemala, se establece un modelo prototipo de estudio, con las características destacadas y las normativas del Plan de Ordenamiento Territorial para zonas de alta densidad urbana dentro de la Ciudad de Guatemala, en las cuales se encuentran la mayoría de los edificios de oficinas.



Se determina un modelo experimental de oficinas, de planta libre de 25 x 49 metros, es decir, 1,225 m²; una altura total de 56 metros que corresponde a la altura total aeronáutica establecida por norma, esto equivale a 14 pisos de 4 metros de altura. Así mismo, partir de similitudes encontradas en los casos de estudio de edificios actuales en el país, el modelo prototipo contará con un porcentaje del 100% de vidrio reflectivo azul en sus fachadas, con una transmisión visible de 0.55, sin dispositivos de control solar.

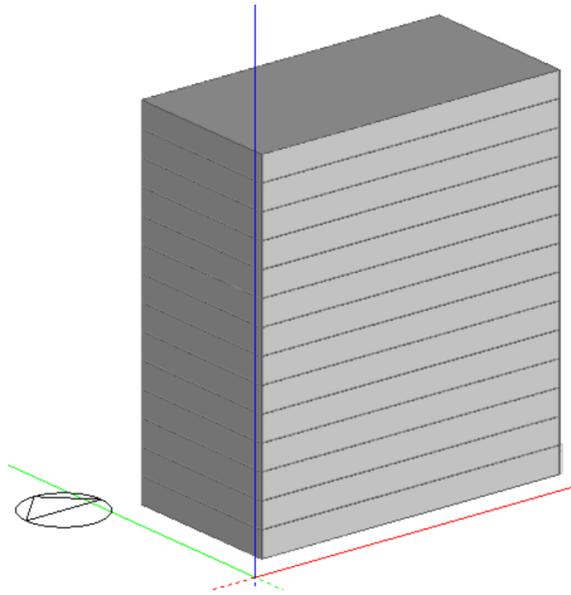


Figura 3. Modelo teórico experimental de edificio de oficinas en la Ciudad de Guatemala

La superficie de planta de 25 x 49 m, se determina en función de la normativa de frente de predio arriba de 21 metros y superficie efectiva de precio arriba de 600 m². El modelo contará con una edificabilidad máxima total de 17,150 m², valor que se encuentra dentro del índice de edificabilidad requerido por norma al multiplicar la superficie efectiva del predio por 9. Debido a que por normativa los primeros cuatro niveles del edificio pueden ir sin ninguna separación a colindancias, se establece una separación de 7 metros para todo el edificio con el fin de lograr una mejor iluminación y simetría en el edificio, esta separación que permite omitir los pozos de luz requeridos por norma para los pisos más altos. Los primeros 3 niveles del edificio se destinan al comercio debido a que el 25% debiera ser de uso comercial según normativa. Se determina un total de 98 puestos de trabajo para cada piso del edificio, para una densidad ocupacional de 0.1 personas/m², cada puesto de trabajo tendrá un computador, con lo cual se establece un 9.6 W/m² de ganancias internas por equipos.

5.1.2. Configuración de plantillas de simulación para diagnóstico de modelo teórico inicial

Para realizar el diagnóstico térmico-lumínico del modelo teórico inicial, se configuran los siguientes parámetros en las plantillas de simulación del programa Design Builder. La diferencia entre el análisis del modelo inicial y la optimización. Para el modelo teórico inicial se establece un caudal de ventilación de 5 l/s persona y 0,6 l/s m², requerido según normativa ASHRAE 62.1 para espacios con alta carga interna por equipos de computación.

Para el cálculo del Useful Daylight Illuminance se establece un rango útil de 100 lux a 2000 lux, lo cual definirá la ocurrencia anual de iluminancias en el plano de trabajo (0.80 metros) donde todas las iluminancias se encuentren dentro de este rango. Se considera una ocurrencia útil arriba del 80%. Para el cálculo de Annual Sunlight Exposure se considera una cuadrícula en la superficie horizontal a nivel del plano de trabajo (0.80 metros), evaluando las zonas expuestas a más de 1000 lux de luz solar directa durante más de 250 horas, en el transcurso de un año, sin exceder el 10%.

Tabla 3. Plantilla de actividad

Recinto	No. de personas	Densidad ocupacional (p/m ²)	Tipo de actividad (met)	Clothing schedule	Días de ocupación	Horario de ocupación	Meses	Otras ganancias internas
Oficina	98	0.1	Sentado, escribiendo (1 met)	Summer	Lunes a viernes	8:00 a 18:00 hrs.	Enero a diciembre	Computadoras 9.6 W/m ²

Tabla 4. Plantilla de construcción

Elemento	Capa exterior	Espesor (m)	Capa intermedia	Espesor (m)	Capa interior	Espesor (m)	Capa interior	Espesor (m)	Espesor total (m)	Valor U (W/m ² K)
Muros internos	tablayeso	0.02	cámara de aire	0.1	tablayeso	0.02	-	-	0.14	1.63
Ventanas	Vidrio reflectivo azul	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-
Techo	Asphalt shingle	0.01	fibra de vidrio	0.14	cámara de aire	0.2	tablayeso	0.02	0.37	0.25
Entrepiso	losa de concreto Urea-	0.1	-	-	-	-	-	-	0.1	2.92
Radier	formaldehyde foam insulation	0.13	losa de concreto	0.1	piso	0.07	-	-	-	-

Tabla 5. Plantilla de iluminación

Tipo de iluminación	Nivel de iluminación	Altura de plano de trajo (m)	Tipo de control	índice de deslumbramiento máximo permitido	Días de ocupación	Horario de ocupación	Meses
LED	500 luxes	0.8	Linear	35	Lunes a viernes	7:30 a 19:00 hrs.	Enero a diciembre

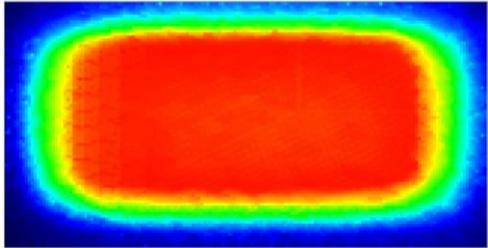
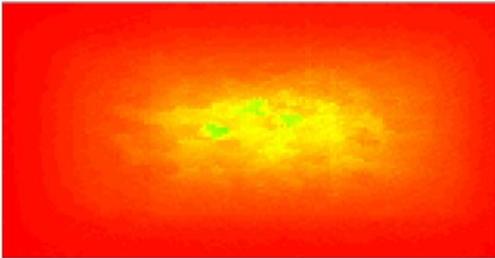
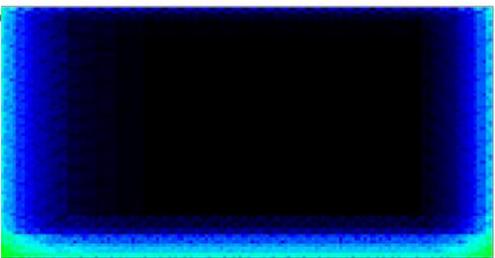
Tabla 6. Plantilla de HVAC

Tipo de ventilación	Economizador	Caudal requerido	Climatización	Días de ocupación	Horario de ocupación	Meses
Mecánica	Differential dry bulb	5 l/s persona y 0,6 l/s m ² .	No	Lunes a viernes	8:00 a 18:00 hrs.	Enero a diciembre

5.1.3. Resultados de diagnóstico térmico-lumínico del modelo teórico inicial

Según las características del modelo teórico inicial, el resultado de las horas de inconfort térmico es de 2,088, lo cual corresponde al 73% de horas de inconfort térmico de la totalidad del tiempo de estudio. Para el cálculo de Useful Daylight Illuminance y Annual Sunlight Exposure se analizó el piso 7, los resultados indican que dentro del área aceptable de UDI se encuentra aproximadamente 66% del área, este porcentaje indica que es aceptable más no óptimo, ya que para que se considere bueno es necesaria una ocurrencia útil arriba del 80%. Así mismo, los resultados de Annual Sunlight Exposure de 30%. Este porcentaje indica que el resultado se encuentra fuera de los parámetros aceptables ya que no debería exceder del 10%, si sobrepasa este límite puede existir riesgo de molestias en los ocupantes debido a sobreexposición de luz del sol directa. En los diagramas de falso color de la Tabla 7, se puede observar que el UDI de la superficie no es óptimo debido a que supera el límite de 2000 lux, esto se puede comprobar al relacionar el diagrama de ASE, en donde efectivamente el porcentaje sobrepasa el 10% en las fachadas este, oeste y sur. También indican un valor de Spatial Daylight Autonomy del 100%, este resultado es favorable ya que supera el 75% del área. Estos resultados se visualizan de mejor en la Tabla 7. Es importante hacer énfasis en que las características del modelo teórico inicial se encuentran dentro de los resultados fallidos de la optimización del modelo experimental, lo cual, se puede observar en el resultado 12 de la Tabla 17 de anexos.

Tabla 7. Resultados de desempeño térmico-lumínico del modelo teórico inicial

MODELO TEÓRICO INICIAL	
Multivariantes de estudio	
Relación ventana-muro (%)	100
Transmitancia térmica de muros (W/m2 K)	-
Transmitancia térmica de ventana (W/m2 K)	5.69
Transmisión lumínica de ventana	0.55
<i>Dispositivos de control solar</i>	
Voladizo (m)	Ninguno
Partesol (a cada 1.55m) (m)	Ninguno
Repisa reflectiva (m)	Ninguno
Resultados de desempeño térmico-lumínico	
<i>Confort térmico (ASHRAE 55-2017 80%) (hrs)</i>	783
<i>27% del tiempo de ocupación en confort térmico</i>	
<i>Confort Lumínico</i>	
1. Useful Daylight Illuminance: 66%	
2. Annual Sunlight Exposure: 30%	
3. Spatial Daylight Autonomy: 100%	
	
	
<p>Hrs</p> <p>2610</p> <p>2088</p> <p>1566</p> <p>1044</p> <p>522</p> <p>0</p>	<p>%</p> <p>100.0</p> <p>80.00</p> <p>60.00</p> <p>40.00</p> <p>20.00</p> <p>0.00</p>

5.2. Optimización del desempeño térmico-lumínico de oficinas

5.2.1. Multivariantes de optimización del desempeño térmico-lumínico

Se identifican las multivariantes de estrategias pasivas de diseño para optimización de fachadas, las cuales son: relación de ventana-muro, transmitancia térmica de la envolvente, dimensionamiento de dispositivos de control solar, transmisión lumínica de ventana. Es necesario reiterar que la mayoría de los casos de estudio analizados están ubicados al norte o sur de la zona ecuatorial, por lo tanto, existe la posibilidad de que algunas estrategias de diseño tengan mejor rendimiento sobre otras en el clima tropical templado de Guatemala. En este análisis se busca determinar los valores de las siguientes variables cuantitativas predictoras que generen una integración óptima en función del confort térmico-lumínico.

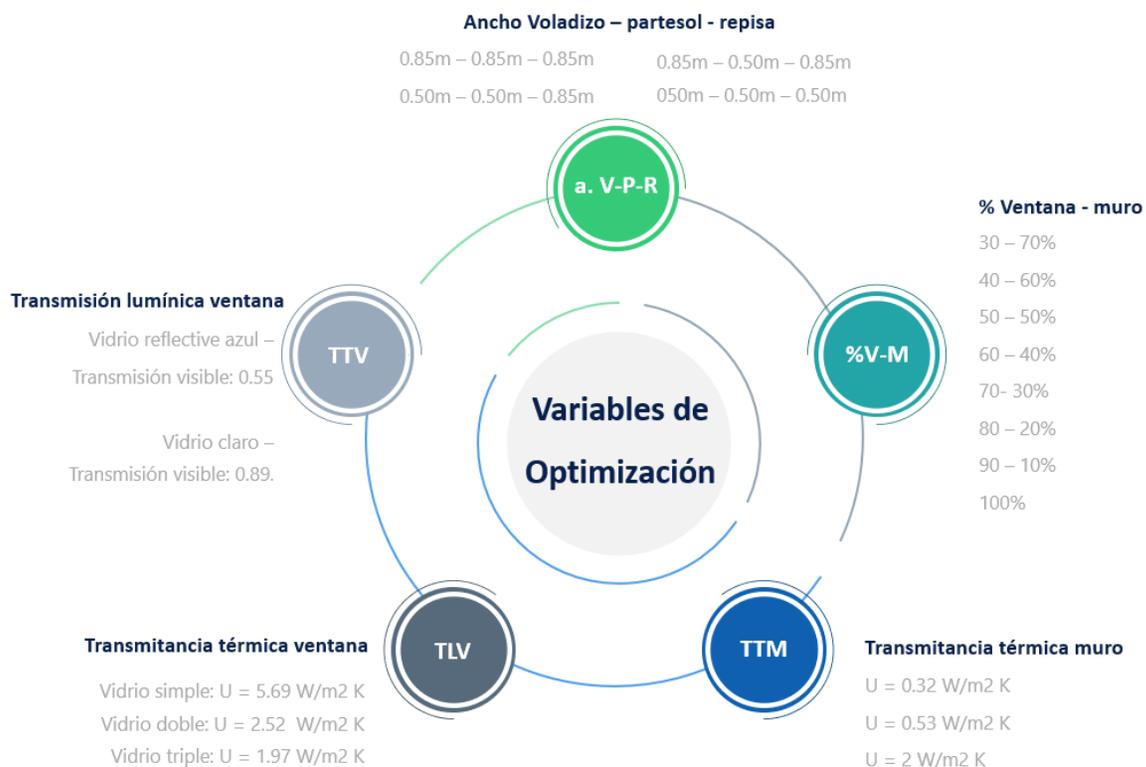


Figura 4. Variables predictoras de optimización de la envolvente

Relación ventana-muro (%V-M)

Se busca encontrar la relación adecuada entre las variables descritas a continuación y el porcentaje de ventana-muro que logre el objetivo de optimización de confort térmico-lumínico. El estudio se hace a partir del 30% hasta el 100% de ventana en intervalos de 10. Así mismo, se estudia el efecto en el modelo del porcentaje ventana-muro con la implementación de dispositivos de control solar y sin ningún tipo de sombreamiento.

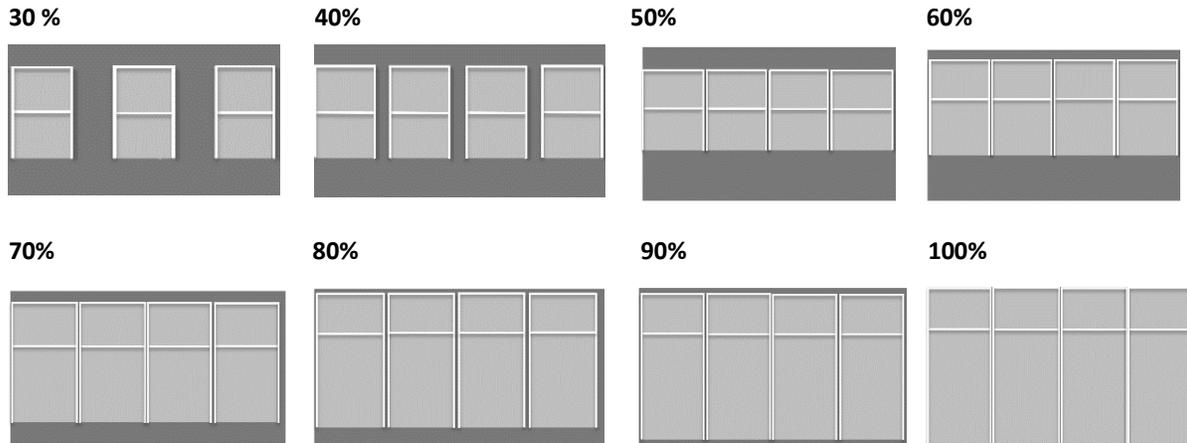


Fig. 5. Porcentaje de relación ventana-muro de 30 a 100% en acercamiento de fachada con dispositivos de control solar

Transmitancia térmica ventana (TTV):

Se busca lograr el balance térmico entre el espacio interior y exterior, a través del estudio de la transmitancia térmica de la ventana a partir de 3 alternativas: 1. Vidrio simple – transmitancia térmica de 5.69 w/m²K. 2. Vidrio simple de 6mm + cámara de argón de 10mm + vidrio simple de 6mm - transmitancia térmica de 2.52 w/m²K. 3. Vidrio simple de 6mm + cámara de argón de 6mm + vidrio simple 6mm + cámara de aire de 6mm + vidrio simple de 6mm- transmitancia térmica de 1.97 w/m²K.

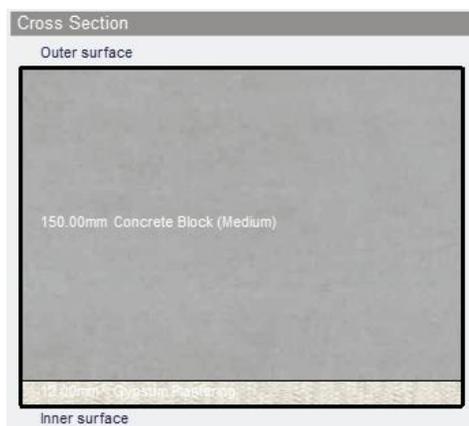
Transmisión lumínica la ventana (TLV):

Se busca maximizar el ingreso de iluminación difusa al interior y minimizar los posibles problemas térmicos y visuales que puede ocasionar la sobreexposición de iluminación directa. Para esto se estudia la transmisión de luz de 2 alternativas en las ventanas. 1. Vidrio reflectivo color azul – transmisión lumínica de 0.55. 2. Vidrio claro – transmisión lumínica de 0.89.

Transmitancia térmica muro (TTM)

Se busca lograr el balance térmico entre el espacio interior y exterior, a través del estudio de la transmitancia térmica del muro a partir de 3 alternativas: 1. forro exterior de block de concreto de 0.15m + forro interior de tablayeso - transmitancia térmica de 2 w/m²K. 2. forro exterior de block de concreto de 0.15m + aislante térmico de lana mineral de 0.05m + forro interior de tablayeso – transmitancia térmica de 0.53 w/m²K. 3. forro exterior de block de concreto de 0.10m + aislante térmico de lana mineral de 0.10m + forro interior de tablayeso – transmitancia térmica de 0.32 w/m²K.

01



02



03



Fig. 6. Detalle de muros de estudio

Ancho de voladizo, partesol y repisa (aV-P-R)

Se realiza un pre-dimensionamiento de los dispositivos de control solar (Fig. 5), a partir del análisis de ángulo solar respecto al modelo de estudio (Fig. 6), estos están enfocados en disminuir la radiación solar directa y aumentar el ingreso de radiación solar difusa, así como generar mayor apertura visual al exterior, a través de las siguientes configuraciones, se busca la relación adecuada de los elementos que obstruyen el ingreso de iluminación directa (voladizo, partesol y repisa), y los elementos que la reflejan (repisa reflectiva), ésta última cumple ambas funciones de obstruir y reflejar. Se estudian 4 configuraciones diferentes para el ancho de voladizo, partesol y repisa. 1. voladizo: 0.50m - partesol: 0.5m - repisa: 0.50m. 2. voladizo: 0.50m – partesol: 0.5m - repisa: 0.85m. 3. voladizo 0.85m – partesol: 0.85m - repisa: 0.50m. 4. voladizo: 0.85m – partesol: 0.85m – repisa: 0.85m. Se establece como constante la distancia entre el voladizo y la repisa de 1.00m, 1.55metros de distancia entre partesoles, y la materialidad de los elementos, de metal pintados de blanco.

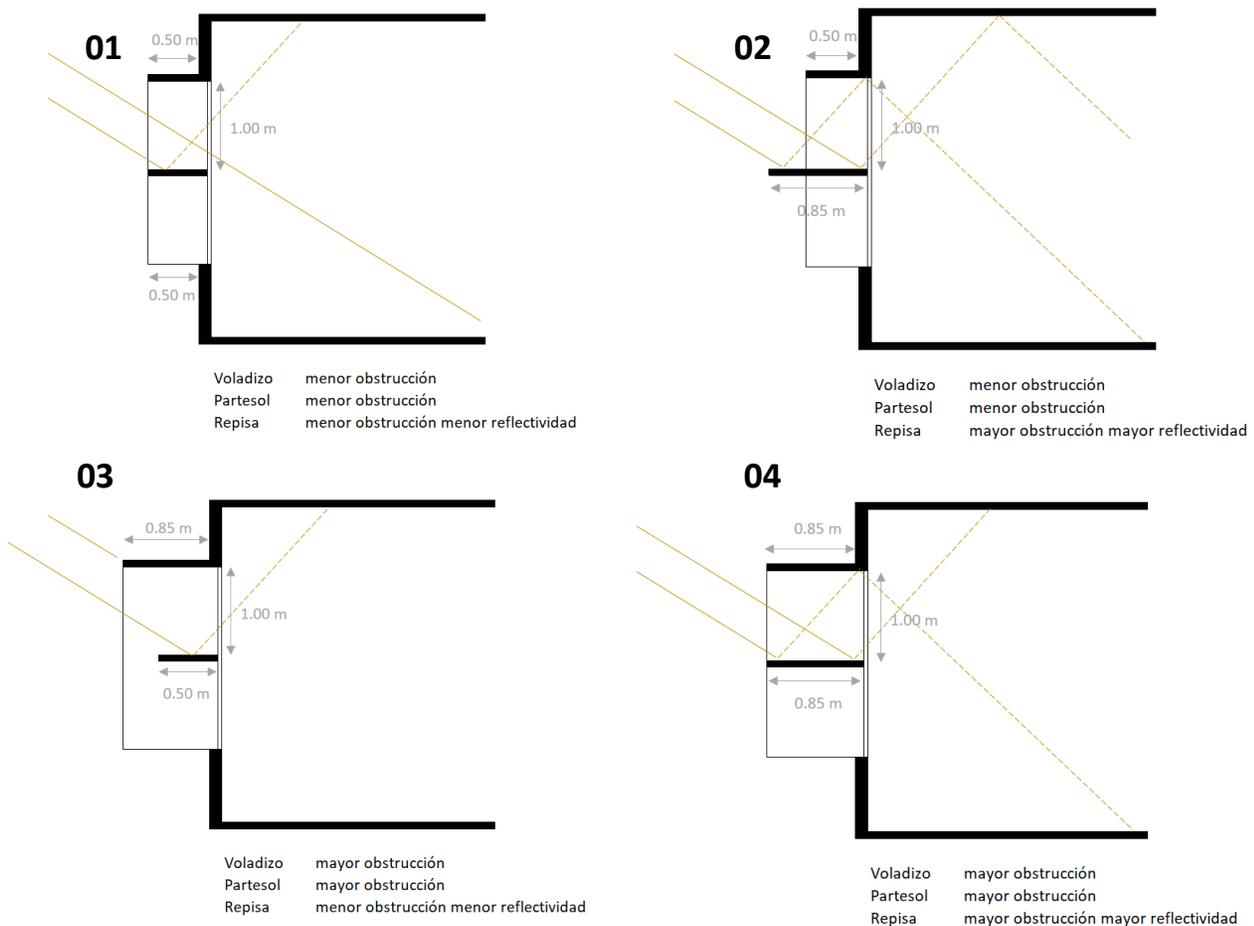


Fig. 7. Tipos de dimensionamiento de dispositivos de control solar

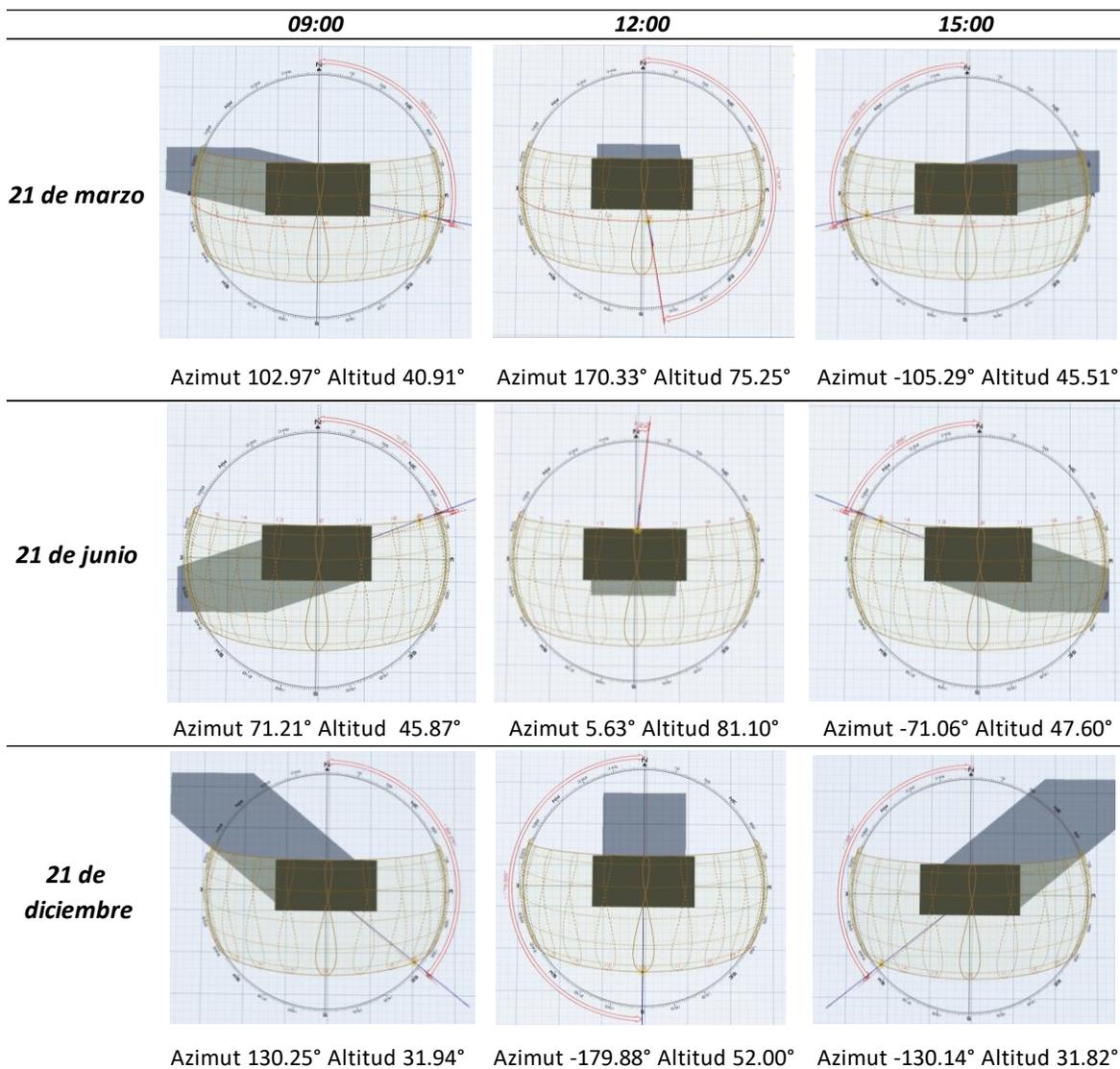


Figura 8. Matriz de análisis de ángulo solar respecto al modelo de estudio para pre-dimensionamiento de dispositivos de control solar Fuente: *Elaboración propia con datos de:*

<http://www.andrewmarsh.com/software/>

Se puede observar en el análisis solar que la mayor radiación se encuentra en las fachadas que dan hacia el este, oeste y sur; en la fachada norte la altitud del sol es de 81.10° para el 21 de junio a las 12:00 horas, por lo tanto, no tiene mayor incidencia solar. Sin embargo, a las 9:00 horas, el 21 de diciembre la altitud del sol es de 31.94° y 40.91° el 21 de marzo, con mayor incidencia en fachada sur y este. A las 15:00 horas, el 21 de diciembre la altitud del sol es de 31.82° y 45.51° el 21 de marzo, con mayor incidencia en fachada sur y oeste.

5.2.2. Metodología para la optimización del desempeño integral térmico-lumínico

El método de optimización en Design Builder emplea algoritmos evolutivos para identificar con mayor facilidad y eficiencia las alternativas del proyecto que ofrecen el mejor desempeño en confort térmico-lumínico, considerando las multivariantes, objetivos y restricciones de diseño, lo cual, permite justificar las directrices de diseño en forma mucho más sólida y consistente que con las simulaciones estándar. En este análisis de optimización, el programa realiza 208 iteraciones que buscan la integración adecuada de las variables predictoras y las restricciones de diseño en función de dos objetivos:

1. Disminuir el consumo de energía para iluminación artificial: Este objetivo de optimización se une con dos restricciones de confort establecidos en las plantillas de iluminación: 1. El sensor de iluminación interior se coloca a 500 luxes (cuando la luz natural disminuye permite que la iluminación general artificial aumente gradualmente), este valor podría ser el adecuado para lograr el confort térmico-lumínico indican Yang & Moon (2019) en su investigación sobre percepción del usuario en el espacio interior. 2. Así mismo, se establece una probabilidad máxima de deslumbramiento del 35%, para evitar molestias por sobreexposición directa al sol. A partir de esto el programa asocia, el objetivo de optimización (disminuir el consumo de energía para iluminación artificial); las multivariantes de optimización que se vinculan con este objetivo (relación de ventana-muro, dimensionamiento de dispositivos de control solar, transmisión lumínica de ventana); y las restricciones en la plantilla de iluminación (sensor de iluminación a 500 luxes y probabilidad máxima de deslumbramiento del 35%). A partir de los resultados óptimos que entrega el programa se verifica el daylight performance, para el piso 7 del modelo experimental, en donde se determina el porcentaje de mayor aceptabilidad del Useful Daylight Illuminance, Annual Sunlight Exposure, y Spatial Daylight Autonomy. Para la verificación de Useful Daylight Illuminance, al igual que en el análisis anterior del modelo teórico inicial, se establece un rango útil de 100 lux a 2000 lux, lo cual definirá la ocurrencia anual de iluminancias en el plano de trabajo (0.80 metros) donde todas las iluminancias se encuentren dentro de este rango. Se considera una ocurrencia útil arriba del 80%. Así mismo, se configuran los mismos parámetros para el cálculo de Annual Sunlight Exposure, en donde se considera una cuadrícula en la superficie horizontal a nivel del plano de trabajo (0.80 metros), evaluando las zonas expuestas a más de 1000 lux de luz solar directa durante más de 250 horas, en el transcurso de un año, sin exceder el 10%.

De igual forma se utiliza la métrica SDA mide la suficiencia de luz diurna para un área determinada, informando un porcentaje del área que excede un valor de iluminancia objetivo (300 lux), durante un período de tiempo específico al año (50% de las horas anuales), se considera un porcentaje favorable mayor a 75%. Debido a las restricciones de confort establecidas en la plantilla de iluminación, se cree que la probabilidad de que los resultados obtenidos se encuentren dentro de un UDI, ASE y SDA aceptable es alta.

Tabla 8. Resumen de métricas de luz natural que se utilizarán para evaluación y alcance de objetivos

Métrica de iluminación natural	Parámetro	Requerimiento óptimo	Referencia
Spatial Daylight Autonomy	300lx / 50%	75% de la superficie	(Mardaljevic, 2014)
Annual Sunlight Exposure	1.000lx, 250hs 100lx	10% de la superficie	(Palarino & Piderit, 2020)
Useful Daylight Illuminance	100lx – 2.000lx	80% de ocurrencia	(Yang & Moon, 2018)
Daylight Glare Probability	20% - 80%	DGP < 35%	(Yang & Moon, 2018)
Percepción térmico-lumínica adecuada	500 lx	-	(Yang & Moon, 2018)

2. *Disminuir las horas de inconfort térmico (ASHRAE 55 80%)*: A partir de los límites indicados en la Fig. 2, el programa determinará la cantidad horas que se salen de los límites de confort térmico e identificará las combinaciones óptimas que disminuyan la cantidad de horas en inconfort térmico. Los límites de temperatura operativa aceptable para espacios acondicionados naturalmente, para lograr un 90% de confort térmico adaptativo, corresponden a un mínimo de 22°C y un máximo de 27°C. y para lograr un 80% de confort térmico adaptativo, corresponden a un mínimo de 21°C y un máximo de 28°C. En este estudio, se establece un met de 1, correspondiente a la agrupación de personas que están sentadas leyendo y escribiendo, así mismo, se tomará un aislamiento promedio de vestimenta de 0.61 clo, que corresponde a la vestimenta en verano para todo el año, debido a que en la zona de estudio no se diferencia de forma marcada la temporada de invierno y verano.

A continuación, se realiza la optimización del desempeño térmico-lumínico, en donde se configuran de igual forma que en el primer análisis de desempeño, los parámetros en las plantillas de actividad, iluminación y HVAC, sin embargo, en la plantilla de construcción se agregan variables para la evaluación del desempeño térmico según tres diferentes configuraciones de transmitancia térmica de muro, ya que se busca comprender qué valores logran un mejor balance térmico entre el espacio interior y exterior, como se explica en la sección 5.2.1. (Multivariables de optimización del desempeño térmico-lumínico); esto se puede visualizar de mejor forma en la tabla 9. En la plantilla de aperturas se configuran 30 diferentes tipos de ventana, según las características de transmisión lumínica y térmica sin la implementación de ningún dispositivo solar, y con la implementación de los 4 diferentes tipos de dispositivos de control solar indicados igualmente en la sección 5.2.1. que buscan identificar la relación adecuada de los elementos que obstruyen el ingreso de iluminación directa (voladizo, partesol y repisa), y los elementos que la reflejan (repisa reflectiva), ésta última cumple ambas funciones de obstruir y reflejar, así como comprender si la disminución de la transmisión lumínica de la ventana es más efectiva para la mejora del confort lumínico del espacio interior que los dispositivos de control solar, o si un diseño óptimo unifica a ambos.

Configuración de plantillas para la optimización del desempeño térmico-lumínico:

Tabla 9. Plantilla de actividad – optimización de desempeño térmico-lumínico

Recinto	No. de personas	Densidad ocupacional (p/m2)	Tipo de actividad (met)	Clothing schedule	Días de ocupación	Horario de ocupación	Meses	Otras ganancias internas
Oficina	98	0.1	Sentado, escribiendo (1 met)	Summer	Lunes a viernes	8:00 a 18:00 hrs.	Enero a diciembre	Computadoras 9.6 W/m2

Tabla 10. Plantilla de construcción – optimización de desempeño térmico-lumínico

Elemento	Capa exterior	Espesor (m)	Capa intermedia	Espesor (m)	Capa interior	Espesor (m)	Capa interior	Espesor (m)	Espesor total (m)	Valor U (W/m2 K)
Muros internos	tablayeso	0.02	cámara de aire	0.1	tablayeso	0.02	-	-	0.14	1.63
Techo	Asphalt shingle	0.01	fibra de vidrio	0.14	cámara de aire	0.2	tablayeso	0.02	0.37	0.25
Entrepiso	losa de concreto	0.1	-	-	-	-	-	-	0.1	2.92
Radier	Urea-formaldehyde foam insulation	0.13	losa de concreto	0.1	piso	0.07	-	-	-	-
<i>Plantillas de de optimización</i>										
Muro exterior 1	Block de concreto	0.15	-	-	-	-	-	-	-	2
Muro exterior 2	Block de concreto	0.15	lana mineral	0.05	tablayeso	0.02	-	-	0.22	0.53
Muro exterior 3	Forro de concreto	0.1	lana mineral	0.1	tablayeso	0.02	-	-	0.22	0.32

Tabla 11. Plantilla de aperturas – optimización de desempeño térmico-lumínico

No.	Descripción de ventana	Valor U (W/m ² K)	Dispositivos de control solar					
			Descripción	Proyección (m)	Descripción	Proyección (m)	Descripción	Proyección (m)
1	Vidrio 6mm reflectivo azul	5.69	-	-	-	-	-	-
2	Vidrio 6mm claro	5.69	-	-	-	-	-	-
3	Vidrio doble (r. azul capa exterior) + cámara intermedia de argón de 10 mm	2.52	-	-	-	-	-	-
4	Vidrio doble claro + cámara intermedia de argón de 10 mm	2.52	-	-	-	-	-	-
5	Vidrio triple (r. azul capa exterior) + cámara intermedia de argón de 6 mm + aire 6mm	1.97	-	-	-	-	-	-
6	Vidrio triple claro + cámara intermedia de argón de 6 mm + aire 6mm	1.97	-	-	-	-	-	-
7	Vidrio 6mm reflectivo azul	5.69	voladizo	0.5	partesol	0.5	repisa	0.5
8	Vidrio 6mm claro	5.69	voladizo	0.5	partesol	0.5	repisa	0.5
9	Vidrio doble (r. azul capa exterior) + cámara intermedia de argón de 10 mm	2.52	voladizo	0.5	partesol	0.5	repisa	0.5
10	Vidrio doble claro + cámara intermedia de argón de 10 mm	2.52	voladizo	0.5	partesol	0.5	repisa	0.5
11	Vidrio triple (r. azul capa exterior) + cámara intermedia de argón de 6 mm + aire 6mm	1.97	voladizo	0.5	partesol	0.5	repisa	0.5
12	Vidrio triple claro + cámara intermedia de argón de 6 mm + aire 6mm	1.97	voladizo	0.5	partesol	0.5	repisa	0.5
13	Vidrio 6mm reflectivo azul	5.69	voladizo	0.5	partesol	0.5	repisa	0.85
14	Vidrio 6mm claro	5.69	voladizo	0.5	partesol	0.5	repisa	0.85
15	Vidrio doble (r. azul capa exterior) + cámara intermedia de argón de 10 mm	2.52	voladizo	0.5	partesol	0.5	repisa	0.85
16	Vidrio doble claro + cámara intermedia de argón de 10 mm	2.52	voladizo	0.5	partesol	0.5	repisa	0.85
17	Vidrio triple (r. azul capa exterior) + cámara intermedia de argón de 6 mm + aire 6mm	1.97	voladizo	0.5	partesol	0.5	repisa	0.85
18	Vidrio triple claro + cámara intermedia de argón de 6 mm + aire 6mm	1.97	voladizo	0.5	partesol	0.5	repisa	0.85
19	Vidrio 6mm reflectivo azul	5.69	voladizo	0.85	partesol	0.85	repisa	0.5
20	Vidrio 6mm claro	5.69	voladizo	0.85	partesol	0.85	repisa	0.5
21	Vidrio doble (r. azul capa exterior) + cámara intermedia de argón de 10 mm	2.52	voladizo	0.85	partesol	0.85	repisa	0.5
22	Vidrio doble claro + cámara intermedia de argón de 10 mm	2.52	voladizo	0.85	partesol	0.85	repisa	0.5
23	Vidrio triple (r. azul capa exterior) + cámara intermedia de argón de 6 mm + aire 6mm	1.97	voladizo	0.85	partesol	0.85	repisa	0.5
24	Vidrio triple claro + cámara intermedia de argón de 6 mm + aire 6mm	1.97	voladizo	0.85	partesol	0.85	repisa	0.5
25	Vidrio 6mm reflectivo azul	5.69	voladizo	0.85	partesol	0.85	repisa	0.85
26	Vidrio 6mm claro	5.69	voladizo	0.85	partesol	0.85	repisa	0.85
27	Vidrio doble (r. azul capa exterior) + cámara intermedia de argón de 10 mm	2.52	voladizo	0.85	partesol	0.85	repisa	0.85
28	Vidrio doble claro + cámara intermedia de argón de 10 mm	2.52	voladizo	0.85	partesol	0.85	repisa	0.85
29	Vidrio triple (r. azul capa exterior) + cámara intermedia de argón de 6 mm + aire 6mm	1.97	voladizo	0.85	partesol	0.85	repisa	0.85
30	Vidrio triple claro + cámara intermedia de argón de 6 mm + aire 6mm	1.97	voladizo	0.85	partesol	0.85	repisa	0.85

Tabla 12. Plantilla de iluminación – optimización de desempeño térmico-lumínico

Tipo de iluminación	Nivel de iluminación	Altura de plano de trajo (m)	Tipo de control	índice de deslumbramiento máximo permitido	Días de ocupación	Horario de ocupación	Meses
LED	500 luxes	0.8	Linear	35	Lunes a viernes	7:30 a 19:00 hrs.	Enero a diciembre

Tabla 13. Plantilla de HVAC – optimización de desempeño térmico-lumínico

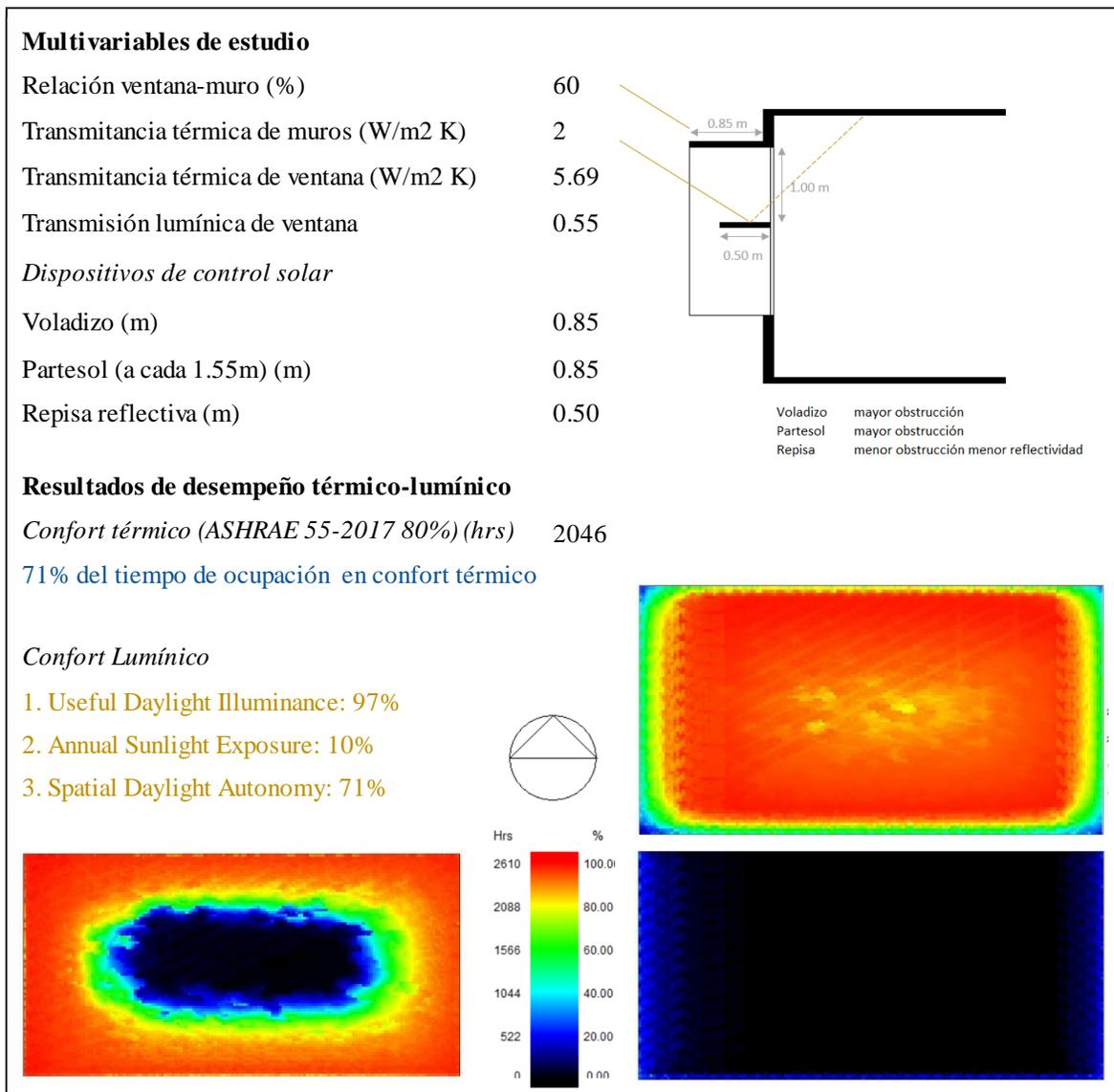
Tipo de ventilación	Economizador	Caudal requerido	Climatización	Días de ocupación	Horario de ocupación	Meses
Mecánica	Differential dry bulb	5 l/s persona y 0,6 l/s m ² .	No	Lunes a viernes	8:00 a 18:00 hrs.	Enero a diciembre

5.2.3. Resultados de optimización del desempeño integral térmico-lumínico

Resultados de optimización

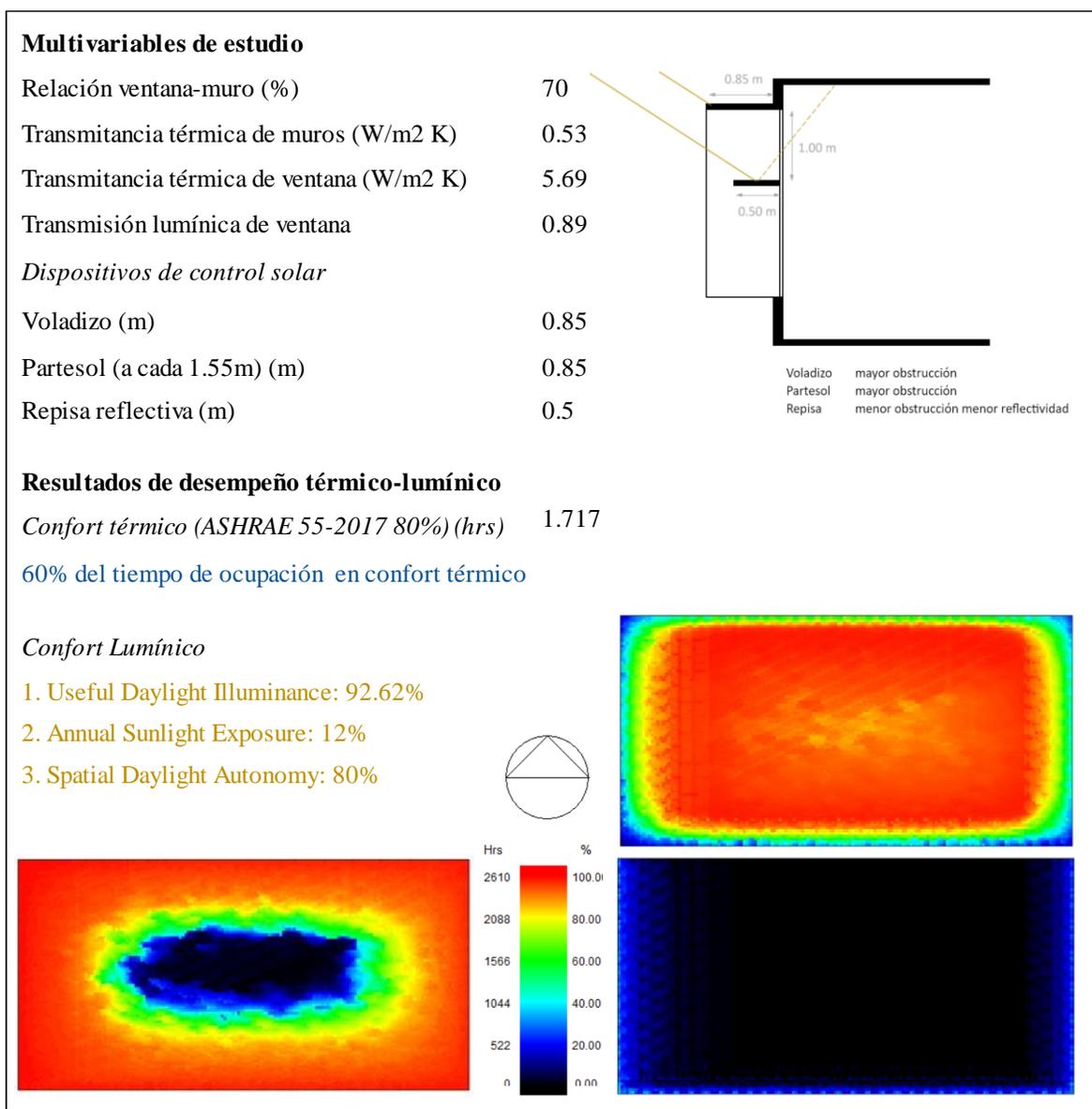
De las 208 iteraciones que realiza el programa Design Builder, se observan 5 resultados óptimos los cuales se observan en la Tabla 12, y 203 fallidos como se muestra en la Tabla 17 en la sección de anexos. La combinación con un mejor desempeño de confort térmico-lumínico corresponde al modelo óptimo 3, en donde la fachada tiene el 70% de acristalamiento reflectivo azul, una transmitancia térmica de 5.69 W/m² K, con dispositivos de control solar de 0.85 metros de ancho, y muro de transmitancia térmica de 2 W/m² K. Los resultados óptimos muestran que el diseño del edificio podría tener desde el 60 hasta el 90% de porcentaje de ventana, siempre y cuando se implementen dispositivos de control solar, así mismo, la tipología de muro que prevalece en los resultados óptimos corresponde a la tipología de muro 1 con transmitancia térmica de 2 W/m² K y el tipo de ventana que prevalece es la de vidrio de 6mm claro, con una transmitancia térmica de 5.69 W/m² K, al igual que en el muro exterior, para ambos la transmitancia térmica es la mayor de los tres valores de estudio.

Tabla 14. Desempeño térmico-lumínico del modelo óptimo 1



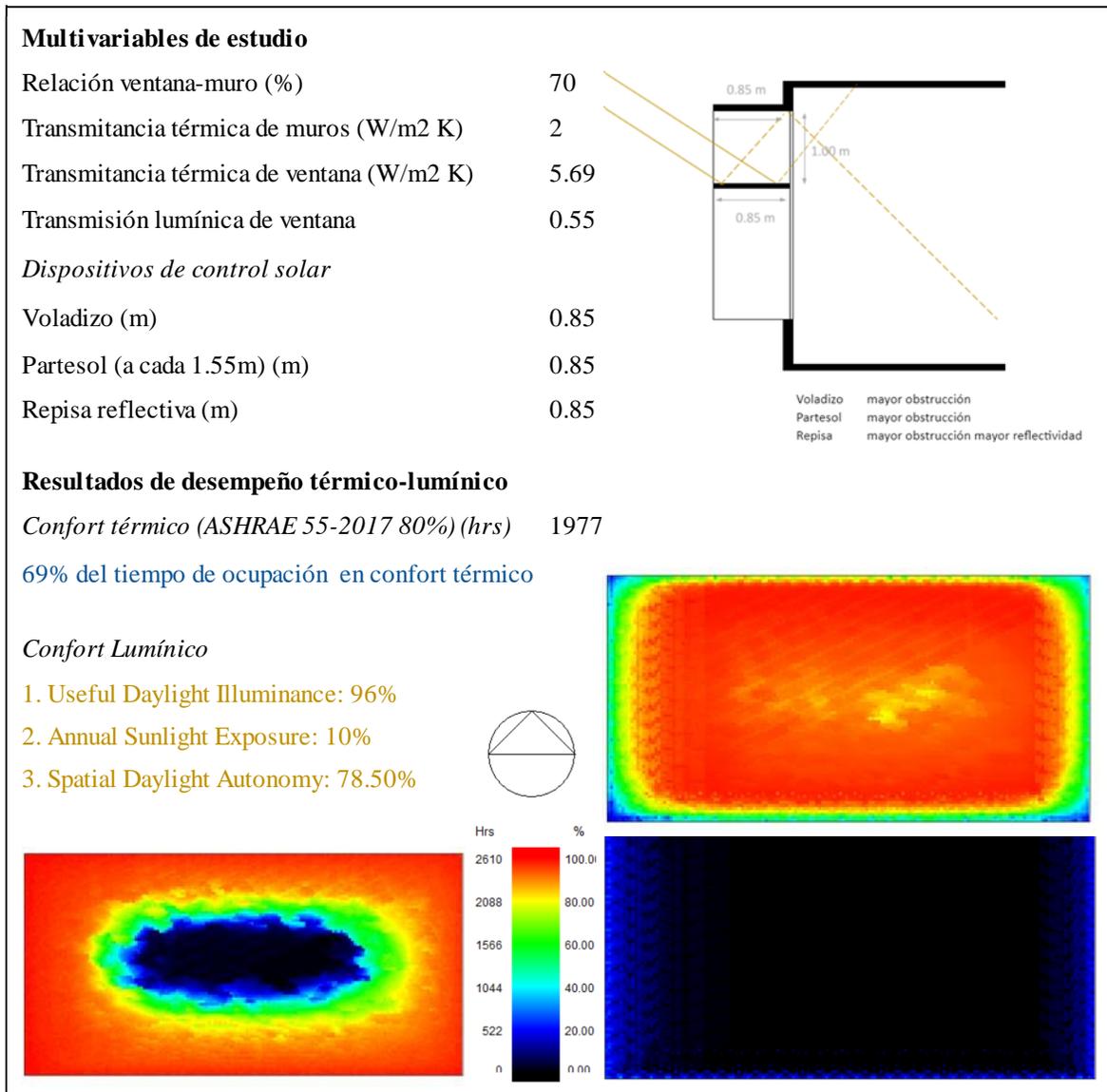
Según las características del modelo óptimo 1, el resultado de las horas de inconfort térmico es de 825, lo cual corresponde al 29% de horas de inconfort térmico de la totalidad del tiempo de estudio. Para el cálculo de Useful Daylight Illuminance y Annual Sunlight Exposure se analizó el piso 7, los resultados indican que dentro del área aceptable de UDI se encuentra aproximadamente 97% del área, este porcentaje indica que es óptimo ya que tiene una ocurrencia útil arriba del 80%. Así mismo, los resultados de Annual Sunlight Exposure de 10%. Este porcentaje indica que el resultado se encuentra dentro de los parámetros aceptables. También indican un valor de Spatial Daylight Autonomy del 71%, lo cual no cumple con el valor de 75% requerido para que sea óptimo. Estos resultados se visualizan de mejor en la Tabla 14.

Tabla 15. Desempeño térmico-lumínico del modelo óptimo 2



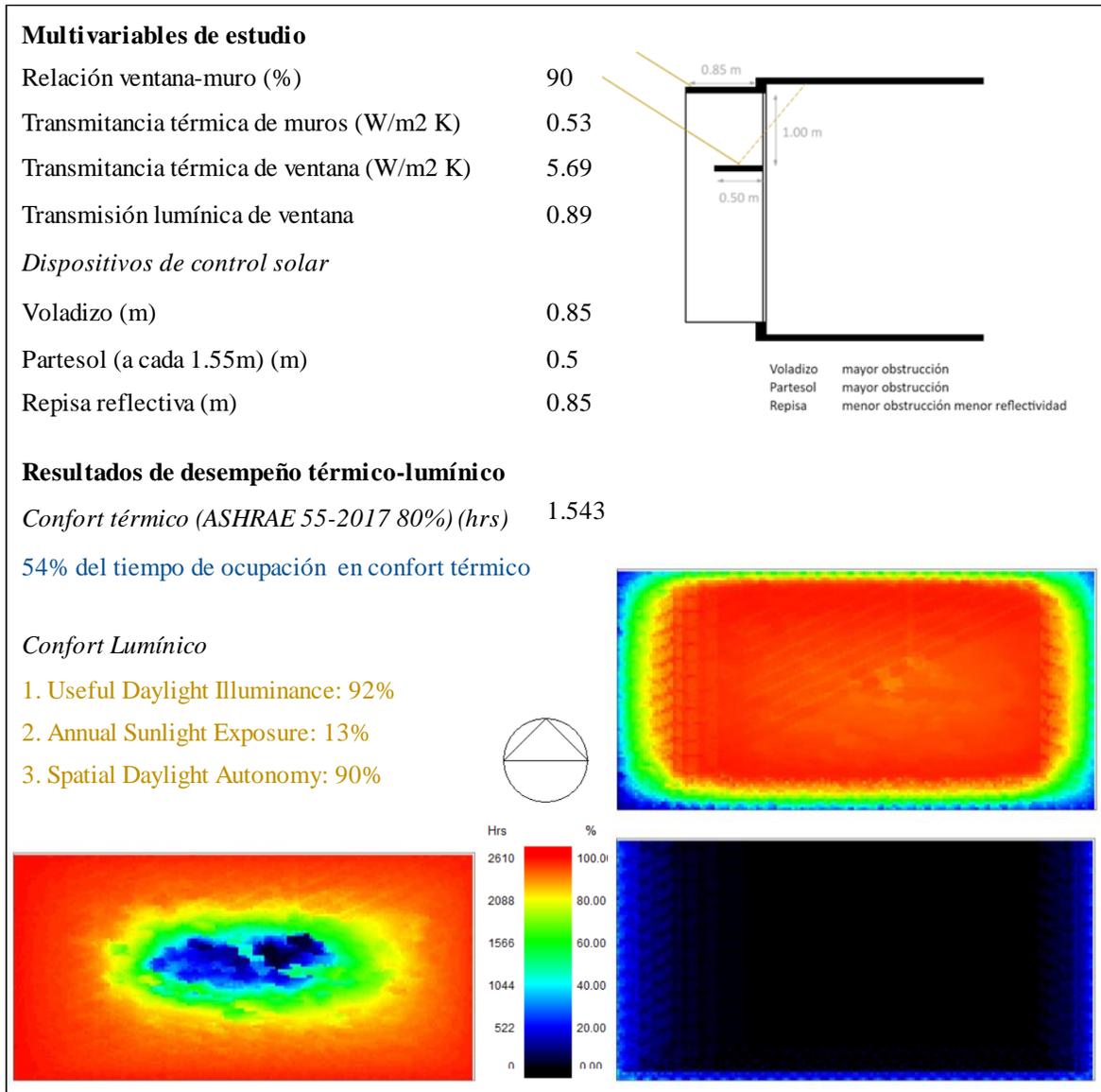
Según las características del modelo óptimo 2, el resultado de las horas de inconfort térmico es de 1154, lo cual corresponde al 40% de horas de inconfort térmico de la totalidad del tiempo de estudio. Para el cálculo de Useful Daylight Illuminance y Annual Sunlight Exposure se analizó el piso 7, los resultados indican que dentro del área aceptable de UDI se encuentra aproximadamente 93% del área, este porcentaje indica que es óptimo ya que tiene una ocurrencia útil arriba del 80%. Así mismo, los resultados de Annual Sunlight Exposure de 12%. Este porcentaje indica que el resultado se encuentra dentro de los parámetros aceptables. También indican un valor de Spatial Daylight Autonomy del 80%, este resultado es favorable ya que supera el 75% del área. Estos resultados se visualizan de mejor en la Tabla 15.

Tabla 16. Desempeño térmico-lumínico del modelo óptimo 3



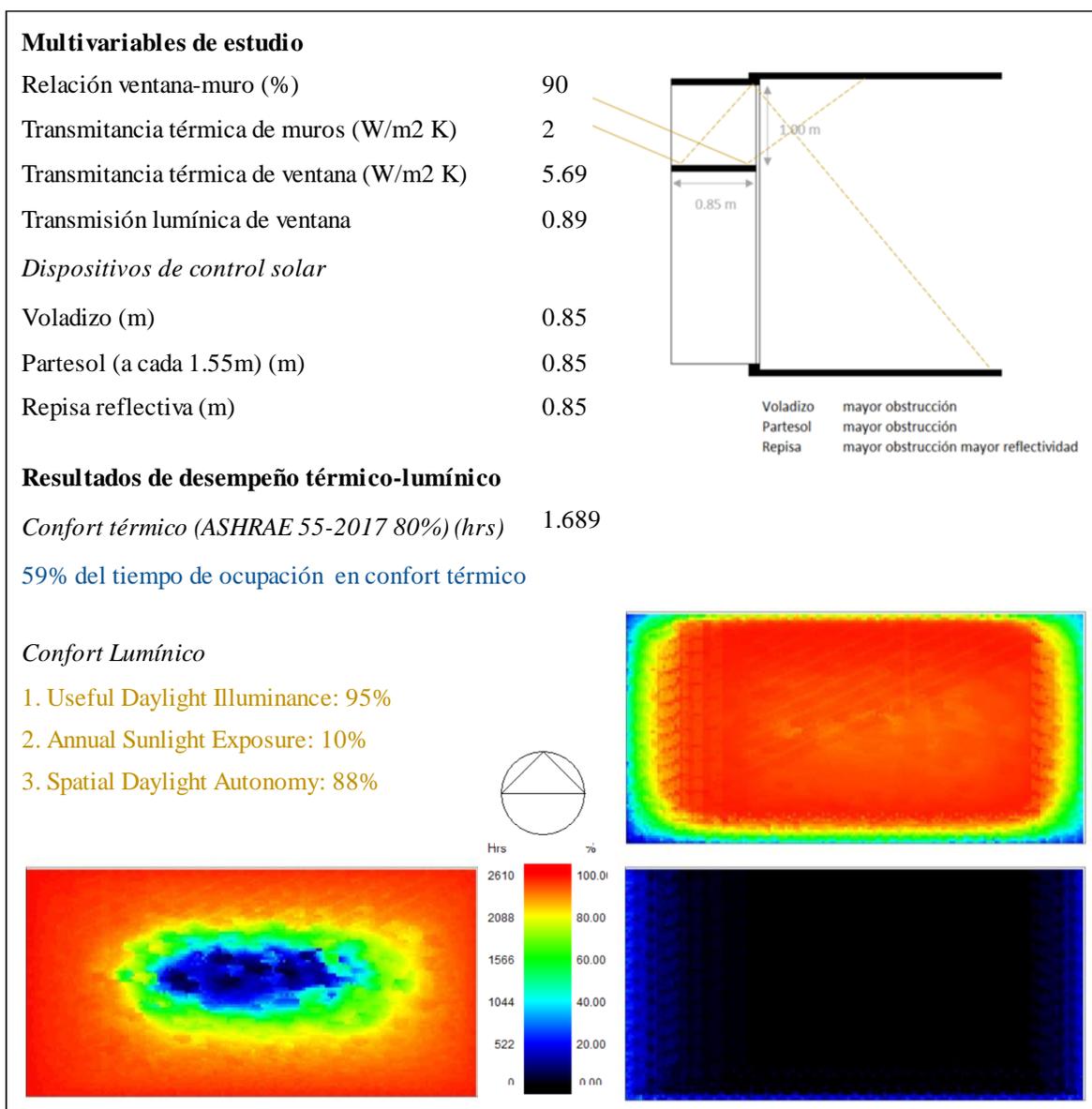
Según las características del modelo óptimo 3, el resultado de las horas de incomfort térmico es de 895, lo cual corresponde al 31% de horas de incomfort térmico de la totalidad del tiempo de estudio. Para el cálculo de Useful Daylight Illuminance y Annual Sunlight Exposure se analizó el piso 7, los resultados indican que dentro del área aceptable de UDI se encuentra aproximadamente 96% del área, este porcentaje indica que es óptimo ya que tiene una ocurrencia útil arriba del 80%. Así mismo, los resultados de Annual Sunlight Exposure de 10%. Este porcentaje indica que el resultado se encuentra dentro de los parámetros aceptables. También indican un valor de Spatial Daylight Autonomy del 79%, este resultado es favorable ya que supera el 75% del área. Estos resultados se visualizan de mejor en la Tabla 16.

Tabla 17. Desempeño térmico-lumínico del modelo óptimo 4



Según las características del modelo óptimo 4, el resultado de las horas de inconfort térmico es de 1328, lo cual corresponde al 46% de horas de inconfort térmico de la totalidad del tiempo de estudio. Para el cálculo de Useful Daylight Illuminance y Annual Sunlight Exposure se analizó el piso 7, los resultados indican que dentro del área aceptable de UDI se encuentra aproximadamente 92% del área, este porcentaje indica que es óptimo ya que tiene una ocurrencia útil arriba del 80%. Así mismo, los resultados de Annual Sunlight Exposure de 13%. Este porcentaje indica que el resultado se encuentra dentro de los parámetros aceptables. También indican un valor de Spatial Daylight Autonomy del 90%, este resultado es favorable ya que supera el 75% del área. Estos resultados se visualizan de mejor en la Tabla 17.

Tabla 18. Desempeño térmico-lumínico del modelo óptimo 5



Según las características del modelo óptimo 5, el resultado de las horas de inconfort térmico es de 1182, lo cual corresponde al 41% de horas de inconfort térmico de la totalidad del tiempo de estudio. Para el cálculo de Useful Daylight Illuminance y Annual Sunlight Exposure se analizó el piso 7, los resultados indican que dentro del área aceptable de UDI se encuentra aproximadamente 95% del área, este porcentaje indica que es óptimo ya que tiene una ocurrencia útil arriba del 80%. Así mismo, los resultados de Annual Sunlight Exposure de 10%. Este porcentaje indica que el resultado se encuentra dentro de los parámetros aceptables. También indican un valor de Spatial Daylight Autonomy del 88%, este resultado es favorable ya que supera el 75% del área. Estos resultados se visualizan de mejor en la Tabla 18.

Tabla 19. Resultados de optimización

No.	Categoría	Energía Iluminación (kWh)	Confort Adaptativo ASHRAE 55 80% aceptabilidad (hr)	Relación ventana-muro %	Plantilla de Construcción	Plantilla de ventana
1	Optimal Design	104566.5	1040	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
2	Optimal Design	118144.5	895	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
3	Optimal Design	114909.8	1154	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 voladizo 0.85 - repisa 0.5 - partesol 0.85
4	Optimal Design	109255.0	1328	90	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 voladizo 0.85 - repisa 0.5 - partesol 0.85
5	Optimal Design	111658.0	1182	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85

Comparación de desempeño térmico-lumínico de modelo teórico inicial y modelo óptimo 3

La optimización de fachadas de edificios en la Ciudad de Guatemala, dependerá en gran medida de las cargas internas por ocupación, equipos e iluminación que se establezcan en el modelo de estudio, sin embargo, en función de las cargas establecidas, se considera que el modelo óptimo 3, es el que tiene un mejor rendimiento térmico-lumínico de todos los resultados óptimos obtenidos, ya que podría brindar 1977 horas de confort térmico, lo cual corresponde a un 69% del total del tiempo de ocupación como se visualiza en la Fig. 11; en comparación con el modelo teórico inicial, el cual brinda únicamente 783 horas de confort térmico, que corresponde al 27% del tiempo total de ocupación, esto se puede visualizar en la Fig. 10. Lo cual indica que podría existir una mejoría del 42% de confort térmico sobre los resultados iniciales.

Así mismo, los resultados del modelo óptimo 3 indican que dentro del área aceptable de Useful Daylight Illuminance se encuentra aproximadamente 96% de la superficie total del piso evaluado, este valor es considerado óptimo, en comparación con el con el modelo teórico inicial, que cuenta únicamente con el 66% del área aceptable de UDI, porcentaje aceptable más no óptimo. Así mismo, los resultados del modelo óptimo 3 muestran un Annual Sunlight Exposure del 10%, este porcentaje es bueno, ya que indica que no habrá probabilidad de molestias por iluminación directa, en comparación con el modelo teórico inicial, el cual muestra un 30%, este porcentaje indica que el resultado se encuentra fuera de los parámetros óptimos ya que no debería exceder el 10%. También se puede observar que el modelo óptimo 3 muestra un Spatial Daylight Autonomy del 79%, en comparación con el modelo teórico inicial el cual muestra un 100% ambos porcentajes son favorables ya que superan el 75%.

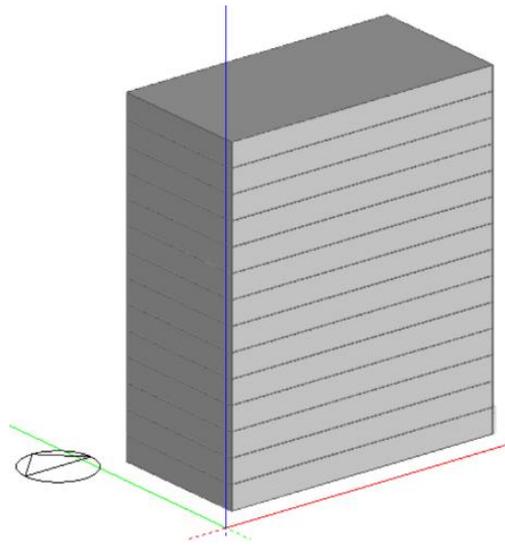


Fig. 9. Modelo teórico experimental inicial

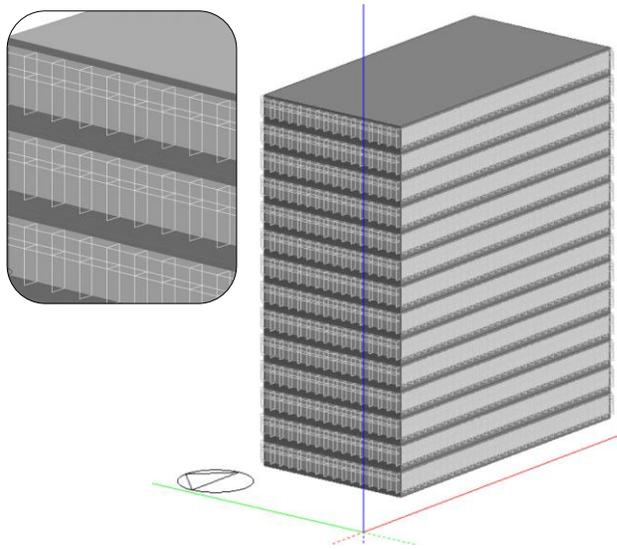
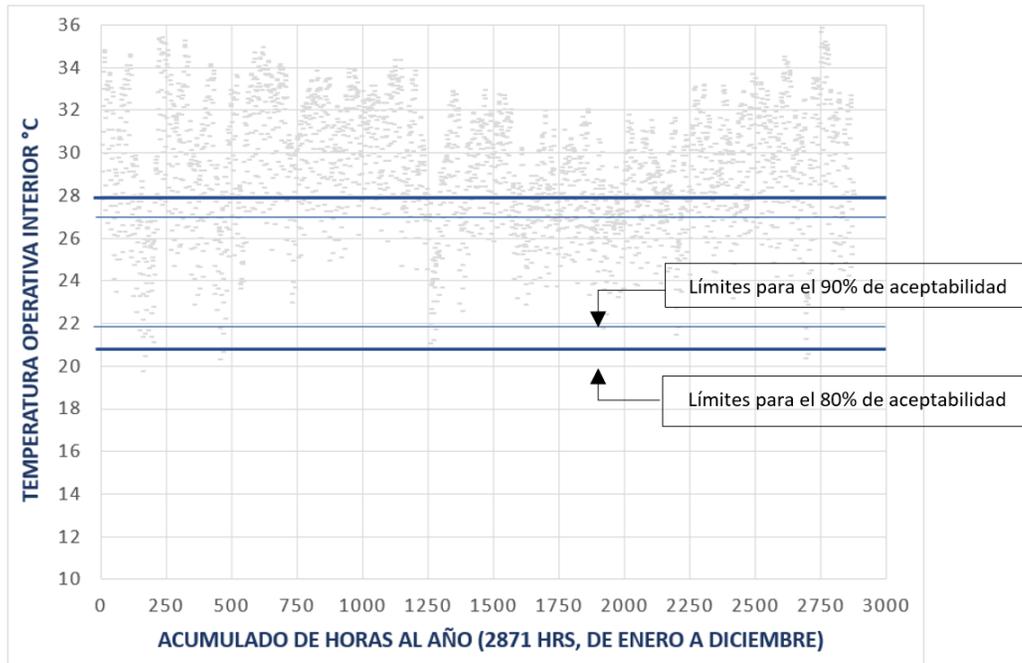
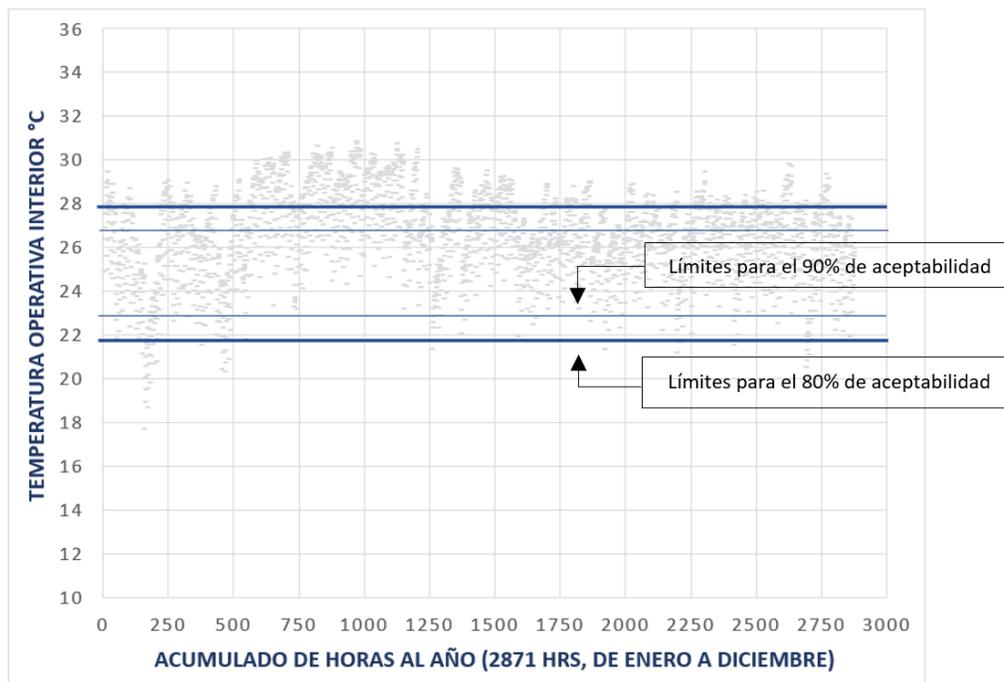


Fig. 10. Mejor optimización de modelo y acercamiento de fachada

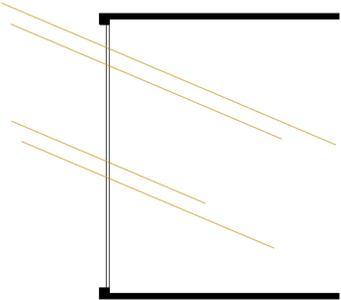
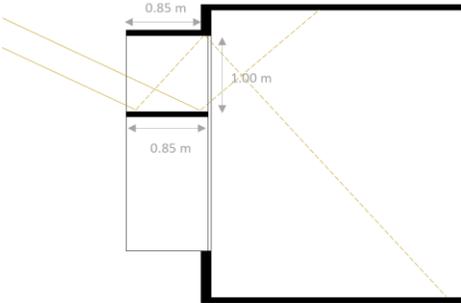


Gráfica 4. Temperatura operativa interior en el tiempo de ocupación (hrs) y su relación con los límites de confort térmico adaptativo según ASHRAE 55-2017 para el 90 y 80%, del modelo teórico inicial



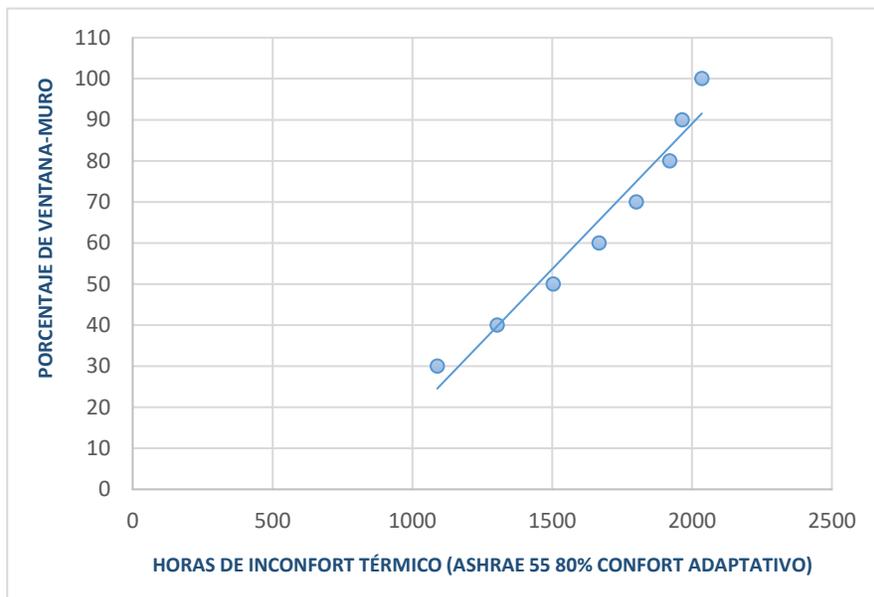
Gráfica 5. Temperatura operativa interior en el tiempo de ocupación (hrs) y su relación con los límites de confort térmico adaptativo según ASHRAE 55-2017 para el 90 y 80%, del modelo óptimo 3

Tabla 20. Comparación de desempeño térmico-lumínico de modelo teórico inicial y modelo óptimo 3

Multivariantes de estudio	Modelo inicial	Modelo óptimo 3
Relación ventana-muro (%)	100	70
Transmitancia térmica de muros (W/m ² K)	-	2
Transmitancia térmica de ventana (W/m ² K)	5.69	5.69
Transmisión lumínica de ventana	0.55	0.55
<i>Dispositivos de control solar</i>		
Voladizo (m)	Ninguno	0.85
Partesol (a cada 1.55m) (m)	Ninguno	0.85
Repisa reflectiva (m)	Ninguno	0.85
<i>Desempeño térmico de modelo inicial</i>	<i>Desempeño térmico de modelo óptimo 3</i>	
27% del tiempo de ocupación en confort térmico	69% del tiempo de ocupación en confort térmico	
<i>Desempeño lumínico modelo inicial</i>	<i>Desempeño lumínico modelo óptimo 3</i>	
1. Useful Daylight Illuminance: 66%	1. Useful Daylight Illuminance: 96%	
2. Annual Sunlight Exposure: 30%	2. Annual Sunlight Exposure: 10%	
3. Spatial Daylight Autonomy: 100%	3. Spatial Daylight Autonomy: 78.50%	
		

Desempeño de confort térmico de la relación de ventana-muro

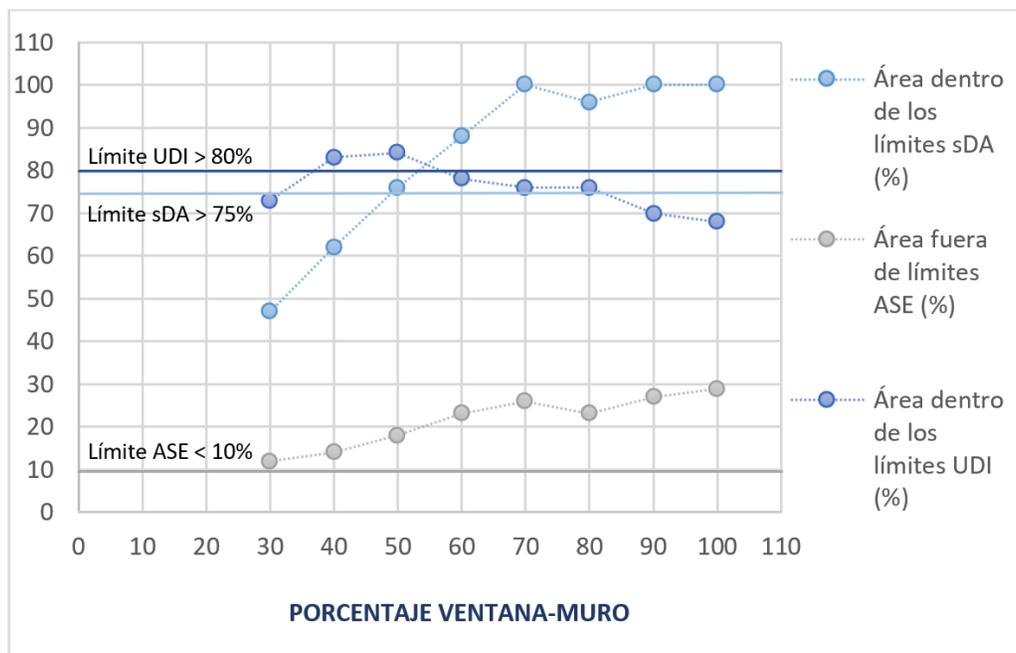
Al estudiar la relación de ventana-muro de forma independiente, se puede notar que existe una correlación directa con las horas de confort térmico, es decir, mientras disminuye el porcentaje de ventana disminuyen también las horas de inconfort térmico, como se puede observar en la figura 12. A pesar de esta correlación entre el porcentaje de ventana-muro y el confort térmico, ésta variable también tendrá una incidencia en el confort lumínico, disminuyendo o aumentando el ingreso de luz natural al interior, lo que generará cierto antagonismo para alcanzar confort térmico y lumínico a la vez (Fig. 13).



Gráfica 6. Correlación directa entre horas de confort térmico adaptativo ASHRAE 55 80% y porcentaje ventana-muro

Desempeño de confort lumínico

Al estudiar la relación de ventana-muro de forma independiente y su influencia en el porcentaje de superficie dentro de los límites de sDa, ASE y UDI, se puede concluir que la única forma de alcanzar un ASE por debajo del 10% es con una relación de ventana del 30%, lo cual no es óptimo para alcanzar valores de UDI y sDA, como se puede ver en la Fig. 13, por lo tanto, para alcanzar los límites permitidos de spatial Daylight Autonomy y Useful Daylight Illuminance, será necesario que el porcentaje de ventana sea mayor al 60%, lo que implica que exista mayor probabilidad de deslumbramiento según los resultados de ASE y sea necesaria la implementación de dispositivos de control solar para disminuir al 10% el Annual Sunlight Exposure.



Gráfica 7. Porcentaje de superficie dentro de límites de sDA, ASE y UDI, en relación con el porcentaje de ventana-muro

Desempeño de confort térmico de variables de transmitancia térmica muro y ventana

Los valores más altos de transmitancia térmica tanto de ventanas como de muros son los adecuados para lograr un mejor equilibrio térmico, siempre y cuando no se utilice ningún sistema de climatización o aire acondicionado; esto puede deberse a que en gran parte el inconfort térmico interior del edificio de estudio, está dado por las altas cargas internas de ocupación, equipo de computación e iluminación y no por la temperatura exterior de la Ciudad de Guatemala, ya que su clima se caracteriza por ser bastante favorable y tener una temperatura media de 21°C, sin altas oscilaciones térmicas.

Desempeño de confort lumínico de transmisión lumínica la ventana

No existe gran mejoría entre los dos valores de transmisión lumínica de la ventana estudiados, ya que en la mayoría de los diseños óptimos los resultados cuentan con vidrio claro y una transmisión de luz de 0.85. Es necesario reiterar que todos los diseños óptimos cuentan con dispositivos de control solar ya que solo con disminuir la transmisión lumínica sin la implementación de dispositivos de control solar no mejora el confort lumínico ni térmico.

Desempeño de confort térmico de variables de ancho de voladizo, partesol y repisa

Existe una influencia del ancho de los dispositivos de control solar y confort térmico, ya que al realizar una comparación del modelo experimental con relación de 70% ventana de transmitancia termica de 5.69 w/m²K y 30% de muro con transmitancia térmica de 0.53 w/m²K, sin ningún dispositivo de control solar, se obtiene un 30% de confort térmico, con los dispositivos de control solar de 0.50 metros se obtiene un 52% de confort térmico, para los dispositivos de control solar de 0.85 para el voladizo y partesol y repisa de 0.50 metros, se obtiene un 60% de confort térmico y para los tres dispositivos de control solar con ancho de 0.85 metros se obtiene un 64% del tiempo en confort térmico.

Tabla 21. Mejora de desempeño térmico de modelo experimental a partir de la implementación y variación de ancho de dispositivos de control solar

No.	Adaptive Comfort ASHRAE 55 80% Acceptability (hr)	Window to Wall %	Construction template	Glazing template
1	1995	70	Muro 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69
2	1360	70	Muro 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 voladizo 0.5 - repisa 0.5 - partesol 0.5
3	1154	70	Muro 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 voladizo 0.85 - repisa 0.5 - partesol 0.85
4	1050	70	Muro 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85

01

30% del tiempo en confort térmico

02

52% del tiempo en confort térmico

03

59% del tiempo en confort térmico

04

64% del tiempo en confort térmico

Desempeño de confort lumínico a partir de la variación de ancho de dispositivos de control solar

El confort lumínico se logrará a través del correcto dimensionamiento de dispositivos de control solar, en combinación con el factor de transmisión lumínica de ventana y la proporción de ventana-muro, por lo tanto, sólo a partir de la correcta integración de estas estrategias se puede mejorar el confort lumínico. Esto se puede visualizar mejor en la Tabla 16, en donde se realiza una comparación del modelo óptimo 2 y 5, y se puede observar que, aunque ambos modelos tienen combinaciones diferentes de fachada ambos logran resultados similares de confort lumínico.

Tabla 22. Comparación de desempeño lumínico de modelo óptimo 2 y 5

MultivARIABLES de estudio	Modelo óptimo 2	Modelo óptimo 5
Relación ventana-muro (%)	70	90
Transmisión lumínica de ventana	0.89	0.89
<i>Dispositivos de control solar</i>		
Voladizo (m)	0.85	0.85
Partesol (a cada 1.55m) (m)	0.85	0.85
Repisa reflectiva (m)	0.5	0.85
<i>Desempeño lumínico modelo óptimo 2</i>		<i>Desempeño lumínico modelo óptimo 5</i>
<ol style="list-style-type: none"> 1. Useful Daylight Illuminance: 92.62% 2. Annual Sunlight Exposure: 12% 3. Spatial Daylight Autonomy: 80% 		<ol style="list-style-type: none"> 1. Useful Daylight Illuminance: 95% 2. Annual Sunlight Exposure: 10% 3. Spatial Daylight Autonomy: 88%

5.2.4. Directrices de diseño para la mejora integral de confort térmico-lumínico de edificios

Se busca determinar las siguientes directrices:

1. *La relación de ventana-muro de la fachada que garantice tanto el confort térmico como lumínico en el interior del edificio:* Una relación de 70% de ventana y 30% de muro logrará resultados óptimos en confort térmico-lumínico interior.
2. *Valor de transmitancia térmica de la envolvente es el adecuado para lograr un mejor equilibrio térmico:* Los resultados de optimización muestran que la tipología de muro que más se repite es la número 1 que corresponde al muro de block de 0.15m de espesor y una transmitancia térmica de 2 W/m² K, es decir, la transmitancia térmica mayor de los tres valores de estudio. Así mismo, el tipo de ventana que más se repite es la de vidrio de 6mm claro, con una transmitancia térmica de 5.69 W/m² K.
3. *El ancho adecuado del voladizo - partesol y repisa reflectiva que permita la mayor obstrucción del ingreso de iluminación directa y maximice la cantidad de luz reflejada al interior.* Un ancho de 0.50 metros para el voladizo, partesol (a cada 1.55) y repisa reflectiva (con separación de 1.00 metro hasta el voladizo), junto con un vidrio claro de transmisión lumínica de 0.85 lograrán un resultado óptimo en confort lumínico.

6. Discusión

Abordar la problemática de incomfort térmico y lumínico en edificios de oficinas en la Ciudad de Guatemala, desde la implementación de estrategias pasivas en fachadas que generen soluciones integradas apuntando a lograr tanto confort térmico como lumínico, parece ser una manera adecuada de lograr esto y adicionalmente disminuir el consumo de energía por sistemas de acondicionamiento e iluminación artificial. En secciones anteriores se muestra que existe una influencia importante de la proporción de ventana-muro e implementación de dispositivos de control solar, en el confort térmico-lumínico, por lo tanto, es preferible estudiarlos en conjunto y no por separado ya que que ambas estrategias son dependientes y es necesario buscar su integración de forma sinérgica. En las investigaciones de Thalfeldt et al (2013) y Alibaba (2016) han mostrado la importancia de la relación óptima de ventana-muro externa en el diseño de fachadas para edificios de energía nula, sin embargo, en ésta investigación se ha determinado que la implementación de dispositivos de control solar, no solamente tiene influencia en el confort lumínico sino que tiene una influencia de igual impacto al de la proporción de ventana-muro en el confort térmico. Así mismo, en el contexto climático de la ciudad de Guatemala, un alto porcentaje de ventana no se relaciona necesariamente con un alto porcentaje de iluminación diurna útil (UDI), ya que los resultados sugieren que a mayor porcentaje de ventana en fachadas sin la implementación de dispositivos de control solar, se puede sobrepasar los límites de UDI de 2000 lux, y disminuir la luz diurna útil, debido a la sobre exposición de luz natural directa, lo que ocasionará problemas de deslumbramiento, esto se confirma a su vez con los resultados que proporciona el diagrama de Annual Sunlight Exposure (ASE), en donde se muestra que al aumentar el porcentaje de ventana, también aumenta el porcentaje de ASE sobre el 10%.

Ochoa et al (2012) y Thalfeldt et al (2013) muestran en sus casos de estudio que se logra mayor confort térmico al disminuir al máximo la transmitancia térmica de la envolvente del edificio, esto se debe a las altas oscilaciones térmicas que existen en estos países ubicados en diferentes zonas climáticas al norte o sur de la zona ecuatorial, sin embargo, en una zona con clima tropical templado como el de la Ciudad de Guatemala, el resultado se invierte y el equilibrio térmico se generó con un valor más alto de transmitancia térmica tanto para muros como ventanas, esto podría deberse a que el análisis se realizó en oscilación libre, pero podría ser que la envolvente necesite otras características de transmitancia térmica menor para obtener un mejor rendimiento sobre el

consumo de energía si se utilizara sistemas de climatización, para el 30% del tiempo de ocupación restante en que no se logró el confort térmico. Aunque no se logra un 100% del tiempo de confort térmico en el espacio interior, los resultados de iluminación natural fueron óptimos, las investigaciones de Yang & Jun (2019) y Te Kulve et al (2016) confirma que la luz influye indirectamente en la temperatura corporal central, controlando así los ritmos termo fisiológicos, por lo tanto, es posible mejorar la percepción de satisfacción térmica de los ocupantes indirectamente al mejorar el confort lumínico ya que la sensibilidad de la reacción a la temperatura depende del nivel de iluminación. Los sensores de iluminación para esta optimización se colocaron a 500 luxes, este valor es adecuado para lograr el confort térmico-lumínico según Yang & Moon (2019), sin embargo, este dato se obtuvo de investigaciones basadas en climas diferentes al de Guatemala, y sería necesario validarlo a través de estudios de percepción del confort térmico-lumínico en este clima, puesto que es más cálido la mayoría del tiempo y podría ser que la percepción de confort térmico-lumínico se obtenga sobre un valor menor a 500 luxes.

7. Conclusiones

Es posible lograr un 100% de confort lumínico en el interior de edificios de oficinas en la Ciudad de Guatemala según las métricas estudiadas de ASE, UDI y sDA, a partir de la implementación de dispositivos de control solar 0.85m de ancho, tanto para el voladizo, partesol y repisa reflectiva, en combinación con el 70% de la envolvente en vidrio reflectivo azul y el 30% de la envolvente de un material sólido. Sin embargo, en la actualidad, la mayoría de los edificios de oficinas construidos en los últimos años carecen de elementos de control solar y cuentan con el 100% de acristalamiento azul reflectivo en sus fachadas, con lo cual, se comprueba que no es posible lograr el 100% de confort lumínico interior debido a problemas de deslumbramiento.

A partir de la aplicación del modelo de confort térmico adaptativo y su influencia respecto a las diferentes estrategias de diseño pasivas de fachadas, es posible alcanzar hasta un 69% del tiempo de ocupación en confort térmico en el interior de edificios de oficinas en la Ciudad de Guatemala. Así mismo, se comprueba que es posible lograr únicamente el 27% de confort térmico interior basándose en las configuraciones del modelo teórico inicial, debido al alto porcentaje de acristalamiento y carencia de elementos de control solar en las fachadas lo que ocasiona problemas de sobrecalentamiento.

Se comprueba que a partir de la metodología de optimización empleada, enfocada en dos objetivos, tanto disminuir las horas de inconfort térmico adaptativo (ASHRAE 55), como disminuir el consumo de iluminación artificial, con las restricciones indicadas en las plantillas de simulación, configuración de materialidad de la envolvente y elementos de control solar, es posible lograr resultados óptimos que mejoren tanto el desempeño del confort térmico como lumínico interior de los edificios en la Ciudad de Guatemala, a partir de estrategias pasivas de diseño.

Anexos

Tabla 23. Resultados de optimización de desempeño térmico-lumínico

No	Category	Energía Iluminación (kWh)	Adaptive Comfort ASHRAE 55 80% Acceptability (hr)	Window to Wall %	Construction template	Glazing template
1	Optimal Designs	104566.5	1040	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
2	Optimal Design	118144.5	895	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
3	Optimal Design	114909.8	1154	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 voladizo 0.85 - repisa 0.5 - partesol 0.85
4	Optimal Design	109255.0	1328	90	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 voladizo 0.85 - repisa 0.5 - partesol 0.85
5	Optimal Design	111658.0	1182	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
6	Failed Constraint	102232.5	2089	100	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
7	Failed Constraint	102232.5	2083	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
8	Failed Constraint	98427.5	2577	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97
9	Failed Constraint	102854.2	2035	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
10	Failed Constraint	96668.4	2576	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52
11	Failed Constraint	103727.9	2431	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 2.52
12	Failed Constraint	102854.2	2088	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69
13	Failed constraint	80065.9	2405	100	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
14	Failed constraint	83638.2	1720	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
15	Failed constraint	79064.8	2457	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
16	Failed constraint	82122.3	2373	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
17	Failed constraint	80955.2	2453	100	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
18	Failed constraint	79113.9	2454	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
19	Failed constraint	83638.2	1720	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
20	Failed constraint	87944.7	1990	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio reflectivo azul - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
21	Failed constraint	80653.4	2356	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
22	Failed constraint	78533.6	2482	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
23	Failed constraint	80653.4	2356	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
24	Failed constraint	78533.6	2485	100	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
25	Failed constraint	80653.4	2356	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85

26	Failed constraint	83638.2	1727	100	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
27	Failed constraint	82122.3	2373	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
28	Failed constraint	79113.9	2454	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
29	Failed constraint	80065.9	2400	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
30	Failed constraint	79113.9	2454	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
31	Failed constraint	80955.2	2453	100	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
32	Failed constraint	79648.4	2424	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
33	Failed constraint	80653.4	2356	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
34	Failed constraint	83638.2	1720	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
35	Failed constraint	79113.9	2454	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
36	Failed constraint	78533.6	2482	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
37	Failed constraint	80065.9	2400	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
38	Failed constraint	78533.6	2482	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
39	Failed constraint	79064.8	2457	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
40	Failed constraint	87944.7	1990	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
41	Failed constraint	81545.2	2408	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
42	Failed constraint	80653.4	2356	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
43	Failed constraint	79174.4	2475	90	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
44	Failed constraint	84671.6	1703	90	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
45	Failed constraint	80826.0	2398	90	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
46	Failed constraint	88008.9	2181	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
47	Failed constraint	79760.8	2435	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
48	Failed constraint	80826.0	2398	90	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
49	Failed constraint	79923.3	2449	90	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
50	Failed constraint	81419.1	2330	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
51	Failed constraint	79760.8	2435	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
52	Failed constraint	79923.3	2449	90	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
53	Failed constraint	79174.4	2481	90	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
54	Failed constraint	79760.8	2435	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
55	Failed constraint	79760.8	2435	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5

56	Failed constraint	89343.1	1942	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
57	Failed constraint	83255.9	2341	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
58	Failed constraint	82654.7	2406	90	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
59	Failed constraint	82239.2	2285	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
60	Failed Constraint	106662.4	1920	80	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69
61	Failed constraint	90949.0	2220	80	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
62	Failed constraint	82078.1	2481	80	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
63	Failed constraint	81041.4	2460	80	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
64	Failed constraint	82729.0	2351	80	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
65	Failed constraint	83330.5	2222	80	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
66	Failed constraint	84479.6	2269	80	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	clear g.0 - u. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
67	Failed constraint	81636.9	2358	80	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	clear g.1 - u. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
68	Failed Constraint	105474.9	1995	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69
69	Failed Constraint	92420.9	1171	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
70	Failed Constraint	121441.7	1199	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 2.52 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
71	Failed Constraint	106058.7	1800	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
72	Failed Constraint	107587.0	2352	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 2.52
73	Failed Constraint	105474.9	2021	70	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
74	Failed Constraint	99678.0	2463	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52
75	Failed Constraint	99013.5	2549	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52
76	Failed Constraint	105474.9	1995	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69
77	Failed Constraint	100419.1	2568	70	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97
78	Failed Constraint	110425.4	2141	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97
79	Failed Constraint	101061.5	2470	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97
80	Failed Constraint	99013.5	2549	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
81	Failed Constraint	100419.1	2560	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97
82	Failed Constraint	105474.9	2021	70	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
83	Failed Constraint	99013.5	2549	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
84	Failed Constraint	100419.1	2568	70	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97
85	Failed Constraint	100419.1	2560	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97

86	Failed constraint	90232.1	2111	70	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
87	Failed constraint	84683.3	2186	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
88	Failed constraint	83418.2	2257	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
89	Failed constraint	82812.3	2436	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U.1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
90	Failed constraint	81643.5	2407	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
91	Failed constraint	94072.8	1902	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
92	Failed constraint	92460.1	2132	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
93	Failed constraint	84253.2	2059	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
94	Failed constraint	83646.3	2291	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
95	Failed constraint	81643.5	2407	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
96	Failed constraint	82244.2	2232	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
97	Failed constraint	99302.3	1905	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
98	Failed constraint	84070.4	2418	70	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
99	Failed constraint	84253.2	2059	70	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
100	Failed Constraint	109976.9	1668	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
101	Failed Constraint	109190.0	1941	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
102	Failed Constraint	103269.0	2534	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97
103	Failed Constraint	109976.9	1668	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
104	Failed Constraint	109976.9	1668	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
105	Failed Constraint	109190.0	1941	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
106	Failed Constraint	101619.9	2525	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52
107	Failed Constraint	103269.0	2534	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97
108	Failed constraint	90740.5	2257	60	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
109	Failed constraint	90740.5	2215	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
110	Failed constraint	91370.9	1856	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
111	Failed constraint	105879.3	1988	60	Oficina tesis wall 2	Vidrio azul - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
112	Failed constraint	91370.9	1856	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
113	Failed constraint	89414.3	2379	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
114	Failed constraint	98805.1	1109	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
115	Failed Constraint	116014.1	1500	50	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69

116	Failed Constraint	115204.9	1871	50	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69
117	Failed constraint	194771.5	2301	50	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
118	Failed constraint	132921.2	1884	50	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
119	Failed constraint	146247.8	2260	50	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
120	Failed constraint	124190.0	1938	50	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
121	Failed Constraint	124485.3	1864	40	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69
122	Failed constraint	97532.0	2088	40	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
123	Failed constraint	189464.7	1811	30	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
124	Failed constraint	141020.3	1907	30	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
125	Failed constraint	208925.9	2246	30	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
126	Failed constraint	103034.8	2061	30	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
127	Failed constraint	126700.7	2133	30	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
128	Failed constraint	103034.8	2061	30	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
129	Failed constraint	116602.7	2069	30	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
130	Failed constraint	86645.4	1477	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
131	Failed constraint	86030.8	1530	100	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
132	Failed constraint	84248.1	1669	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
133	Failed constraint	84248.1	1669	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.6
134	Failed constraint	85028.2	1587	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
135	Failed constraint	84248.1	1669	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
136	Failed constraint	86030.8	1524	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio reflectivo azul - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
137	Failed constraint	111070.4	2042	90	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 voladizo. 0.5 - repisa 0.85 - partesol 0.5
138	Failed constraint	85744.3	1621	90	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
139	Failed constraint	87921.4	1442	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
140	Failed constraint	87295.1	1510	90	Oficina tesis wall 2	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
141	Failed constraint	86368.2	1546	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
142	Failed constraint	88571.2	1446	90	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
143	Failed constraint	85290.2	1633	90	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
144	Failed constraint	113118.5	1242	80	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 voladizo. 0.5 - repisa 0.85 - partesol 0.5
145	Failed constraint	90382.2	1460	80	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85

146	Failed constraint	87472.2	1652	80	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
147	Failed constraint	90382.2	1476	80	Wall 3 - 0.32 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
148	Failed constraint	91019.3	1331	80	Wall 1 - U: 2 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
149	Failed constraint	108712.5	1771	70	Wall 1 - U: 2 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 1.97 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
150	Failed constraint	110416.0	1360	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
151	Failed constraint	120620.7	1516	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 2.52 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
152	Failed constraint	114909.8	1154	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 voladizo 0.85 - repisa 0.5 - partesol 0.85
153	Failed constraint	116449.6	1396	70	Wall 1 - U: 2 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 2.52 - ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
154	Failed constraint	110416.0	1360	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
155	Failed constraint	88231.7	1574	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
156	Failed constraint	91779.9	1387	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
157	Failed constraint	94720.2	1569	70	Wall 1 - U: 2 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 2.52 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
158	Failed constraint	91779.9	1387	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
159	Failed constraint	93695.7	1281	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
160	Failed constraint	99964.5	1543	70	Wall 1 - U: 2 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
161	Failed constraint	88231.7	1574	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
162	Failed constraint	91779.9	1387	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
163	Failed constraint	91779.9	1416	70	Wall 3 - 0.32 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
164	Failed constraint	88231.7	1574	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
165	Failed constraint	91779.9	1387	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
166	Failed constraint	90738.8	1265	70	Wall 1 - U: 2 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
167	Failed constraint	91779.9	1416	70	Wall 3 - 0.32 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
168	Failed constraint	90738.8	1265	70	Wall 1 - U: 2 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
169	Failed constraint	90738.8	1265	70	Wall 1 - U: 2 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
170	Failed constraint	142671.0	1534	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 1.97 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
171	Failed constraint	136143.7	1438	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 2.52 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
172	Failed constraint	136143.7	1513	60	Wall 3 - 0.32 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 2.52 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
173	Failed constraint	116625.1	2071	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio claro - U. 1.97 voladizo 0.85 - repisa 0.5 - partesol 0.85
174	Failed constraint	142671.0	1534	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio r. azul - U. 1.97 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
175	Failed constraint	98003.9	1526	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m²K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5

176	Failed constraint	106353.1	1629	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
177	Failed constraint	98676.4	1226	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
178	Failed constraint	114455.3	1375	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
179	Failed constraint	106353.1	1629	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
180	Failed constraint	103884.3	1342	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
181	Failed constraint	104566.5	1040	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
182	Failed constraint	102295.9	1593	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 2.52 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
183	Failed constraint	203765.5	1398	50	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
184	Failed constraint	123237.5	1621	50	Wall 3 - 0.32 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
185	Failed constraint	181497.3	1261	50	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
186	Failed constraint	158384.2	1332	50	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
187	Failed constraint	168881.8	1531	40	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
188	Failed constraint	122189.2	1345	40	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 1.97 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
189	Failed constraint	169625.3	993	40	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
190	Failed constraint	123296.8	886	40	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
191	Failed constraint	333008.1	1357	30	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
192	Failed constraint	330852.5	2089	30	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
193	Failed constraint	190334.0	1034	30	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
194	Failed constraint	128094.0	1525	30	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
195	Failed constraint	190334.0	1034	30	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
196	Failed constraint	128746.5	827	30	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
197	Failed constraint	190334.0	1034	30	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
198	Failed constraint	86645.4	1477	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
199	Failed constraint	84414.8	1642	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
200	Failed constraint	86030.8	1524	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.85
201	Failed constraint	85028.2	1587	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.5
202	Failed constraint	87484.5	1406	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
203	Failed constraint	84248.1	1669	100	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5
204	Failed constraint	86865.6	1454	100	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 ov. 0.85 - ref. ov. 0.85 - s.f. 0.85
205	Failed constraint	110416.0	1360	70	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 5.69 voladizo 0.50 - repisa 0.50 - partesol 0.50

206	Failed constraint	137006.1	1003	60	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 2.52 ovoladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
207	Failed constraint	142671.0	1534	60	Wall 2 - U: 0.53 w/m ² K	Vidrio r. azul - U. 1.97 voladizo 0.85 - repisa 0.85 - partesol 0.85
208	Failed constraint	123296.8	886	40	Wall 1 - U: 2 w/m ² K	Vidrio claro - U. 5.69 ov. 0.5 - ref. ov. 0.5 - s.f. 0.5

8. Referencias bibliográficas

Ahn, B. L., Kim, J. H., Jang, C. Y., Leigh, S. B., & Jeong, H. (2016). Window retrofit strategy for energy saving in existing residences with different thermal characteristics and window sizes. *Building Services Engineering Research and Technology*, 37(1), 18–32. <https://doi.org/10.1177/0143624415595904>

Alibaba, H. (2016). Determination of optimum window to external wall ratio for offices in a hot and humid climate. *Sustainability (Switzerland)*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/su8020187>

ANSI/ASHRAE. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. In *ASHRAE Inc.* (Vol. 2017, p. 66). <https://doi.org/ISSN 1041-2336>

Asadi, E., da Silva, M. G., Antunes, C. H., & Dias, L. (2012). A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. *Building and Environment*, 56, 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.005>

Bluyssen, P. (2012). The Indoor Environment Handbook. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability* (Vol. 165, Issue 3). <https://doi.org/10.1680/ensu.10.00054>

CEPAL, NDF, BID, M.-G. (2018). *La economía del cambio climático en Guatemala*.

de la Paz, G. (2012). *Recurso energético de control solar . Evolución y propuesta de diseño optimizado para Camagüey. XXXIII*.

Faisal, G., & Aldy, P. (2016). Typology of building shading elements on Jalan Sudirman corridor in Pekanbaru. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 128(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/128/1/012029>

- Garretón, J. Y., Rodríguez, R., & Pattini, A. (2016). Effects of perceived indoor temperature on daylight glare perception. *Building Research and Information*, 44(8), 907–919. <https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1103116>
- Gasparella, A., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Romagnoni, P., & Baggio, P. (2011). Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building. *Energy and Buildings*, 43(4), 1030–1037. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.032>
- Huebner, G. M., Shipworth, D. T., Gauthier, S., Witzel, C., Raynham, P., & Chan, W. (2016). Saving energy with light? Experimental studies assessing the impact of colour temperature on thermal comfort. *Energy Research and Social Science*, 15, 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.02.008>
- Jara, P. (2015). *Confort térmico, su importancia para el diseño arquitectónico y la calidad ambiental del espacio interior.*
- Jiménez, R. (2015). *Incidencia lumínica y radiación en el interior de los edificios.*
- Kazanasmaz, T., Grobe, L. O., Bauer, C., Krehel, M., & Wittkopf, S. (2016). Three approaches to optimize optical properties and size of a South-facing window for spatial Daylight Autonomy. *Building and Environment*, 102, 243–256. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.018>
- Košir, M., Pajek, L., Iglič, N., & Kunič, R. (2018). A theoretical study on a coupled effect of building envelope solar properties and thermal transmittance on the thermal response of an office cell. *Solar Energy*, 174(September), 669–682. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.042>
- León, J. (2013). Parámetros de diseño de la chimenea solar. In *Escuela Politécnica Superior de Edificaciones de Barcelona: Vol. Master the.*
- Leskovar, V. Ž., & Premrov, M. (2011). An approach in architectural design of energy-efficient timber buildings with a focus on the optimal glazing size in the south-oriented façade. *Energy and Buildings*, 43(12), 3410–3418. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.003>
- López, L. A. L., Prieto, J. J. F., Tecnológico, I., Gutiérrez, D. T., Panamericana, C., & Gutiérrez, T. (2018). *Modelo de confort térmico adaptativo en Tuxtla Gutiérrez. October 2017*, 3–9.

- Mansfield, K. P. (2018). Architectural lighting design: A research review over 50 years. *Lighting Research and Technology*, 50(1), 80–97. <https://doi.org/10.1177/1477153517736803>
- Mardaljevic, J. (2014). *Useful Daylight Illuminance : A New Paradigm for Assessing Daylight in Buildings 1 Introduction. March 2005*. <https://doi.org/10.1191/1365782805li128oa>
- Ochoa, C. E., Aries, M. B. C., van Loenen, E. J., & Hensen, J. L. M. (2012). Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. *Applied Energy*, 95, 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.042>
- Palarino, C., & Piderit, M. B. (2020). Optimisation of passive solar design strategies in side-lit offices: Maximising daylight penetration while reducing the risk of glare in different chilean climate contexts. *Journal of Daylighting*, 7(1), 107–121. <https://doi.org/10.15627/jd.2020.9>
- te Kulve, M., Schellen, L., Schlangen, L. J. M., & van Marken Lichtenbelt, W. D. (2016). The influence of light on thermal responses. *Acta Physiologica*, 216(2), 163–185. <https://doi.org/10.1111/apha.12552>
- Thalfeldt, M., Pikas, E., Kurnitski, J., & Voll, H. (2013). Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate. *Energy and Buildings*, 67, 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.027>
- Waldo Bustamante, G., Encinas, F., Pino, A., & Otarola, R. (2011). Strategies for improving thermal performance and visual comfort in office buildings of central Chile. *PLEA 2011 - Architecture and Sustainable Development, Conference Proceedings of the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, July 2016*, 903–908.
- Yang, W., & Jun, H. (2019). Combined effects of acoustic, thermal, and illumination conditions on the comfort of discrete senses and overall indoor environment. *Building and Environment*, 148(December 2018), 623–633. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.040>
- Yang, W., & Moon, H. J. (2018). Cross-modal effects of illuminance and room temperature on indoor environmental perception. *Building and Environment*, 146(October), 280–288. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.007>

Zambrano Prado, P. (2013). *Control solar e iluminación Natural en la arquitectura dispositivos de control solar fijos en clima semicálido-subhúmedo.*